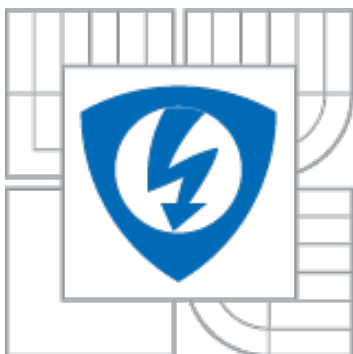




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

# AUTOMATICKÉ MĚŘÍCÍ PRACOVISTĚ U-I CHARAKTERISTIK SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

V-I CHARACTERISTIC OF SOLAR CELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. TOMASZ KADERKA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.

BRNO, 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

## Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Elektrotechnická výroba a management

**Student:** Bc. Tomasz Kaderka  
**Ročník:** 2

**ID:** 72504  
**Akademický rok:** 2010/2011

### NÁZEV TÉMATU:

**Automatické měřicí pracoviště U-I charakteristik solárních článků**

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou solárních článků. Navrhněte a naprogramujte (VEE, LabVIEW nebo C++) automatické měřicí pracoviště pro měření U-I charakteristik solárních článků. Na realizovaném pracovišti proměřte charakteristiky vybraných vzorků a výsledky porovnejte s komerčně vyráběným zařízením.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 26.5.2011

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

**prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.**  
*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## ANOTACE:

Cílem teoretické části práce je nastínit možnosti přeměny sluneční energie, seznámit se s problematikou a historií fotovoltaiky a popsat fotovoltaickou přeměnu energie. Dále pak popsat princip měření VA charakteristik fotovoltaických článků. Tato problematika není tak jednoduchá, jak by se na první pohled mohlo zdát, protože fotovoltaický článek není lineární součástka, u které je měření velice jednoduché. Analýzu VA charakteristiky fotovoltaických článků ovlivňuje více parametrů, jako např.: intenzita osvětlení, teplota, sériový a paralelní odpor, sklon zdroje záření a další.

Praktická část práce se zabývá vytvořením pracoviště pro automatické měření VA charakteristik fotovoltaických článků v programovacím prostředí LabVIEW. Cílem je vytvoření funkčního programu, který automaticky změří VA charakteristiku nejen při osvětleném článku, ale i při zastíněném článku (režim diody). Program vypočítá výkon a důležité parametry, jako je proud nakrátko, napětí naprázdno, maximální výkon, proud a napětí při maximálním výkonu článku. Program umožňuje exportovat naměřené hodnoty do textového souboru. V poslední kapitole práce je provedeno kontrolní měření tří vzorků monokrystalického fotovoltaického článku na vytvořeném měřicím pracovišti. Měření je porovnáno s referenčním přístrojem Solar Cell tester

## ANNOTATION

The theoretical part is to outline the possibilities of solar energy conversion, learn about the issues solar cells and describe the history of photovoltaics and photovoltaic energy conversion. Then describe principle of the measurement VA characteristics of photovoltaic cells. This issue is not as easy as it seems at first sight, because the solar cell isn't a linear component, which is very easy to measure. Analysis of VA characteristic of photovoltaic cells affects parameters such as: light intensity, temperature, serial and parallel resistance, the slope of the light source, and more.

The practical part deals with creating a workplace for automatic measurement of VA characteristics of photovoltaic cells in the LabVIEW. Challenge is to create a functional program, which automatically measures the VA characteristics not only in the lighted cells, but also in the shaded cell (diode mode). The program calculates the power and important

parameters, such as short-circuit current, open circuit voltage, maximum power, current and voltage at maximum power article. The program allows you to export the measured values to a text file. In the last chapter of this work is made control measurements of three samples of monocrystal photovoltaic cell by the measuring workplace. The measurement is compared with the reference device Solar Cell Tester

## KLÍČOVÁ SLOVA

Fotovoltaický článek, solární článek, fotovoltaika, VA charakteristika, slunce, fotoelektrický jev, historie fotovoltaiky, LabVIEW

## KEY WORDS

Photovoltaic cell, solar cell, VA characteristics, sun, photoelectric effect, the history of photovoltaics

## Bibliografická citace díla:

KADERKA, T. *Automatické měřicí pracoviště U-I charakteristik solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 61 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D..

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne :

Podpis:

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci.

V Brně dne :

Podpis:

## **Obsah**

<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>2. PŘEMĚNA SLUNEČNÍ ENERGIE .....</b>	<b>11</b>
2.1 Historie fotovoltaiky.....	11
2.2 Fotoelektrický jev .....	12
2.3 Generace a separace náboje.....	13
Fotogenerace.....	13
Nábojová separace.....	14
<b>3. VA CHARAKTERISTIKY.....</b>	<b>15</b>
3.1 Způsob měření .....	15
3.2 Důležité parametry .....	16
<b>4. NÁVRH A REALIZACE PROGRAMU .....</b>	<b>21</b>
4.1 Zadání.....	21
4.2 Rozbor problému .....	21
4.2.1 Přístroje .....	21
4.2.2 Volba programového prostředí .....	22
4.2.3 Programové řešení.....	22
4.3 Výroba přepínače polarity .....	24
4.3.1 Popis funkce přepínače polarity .....	24
4.3.2 Seznam součástek: .....	24
4.3.3 Plošný spoj .....	25
4.3.4 Schéma zapojení celé měřicí sestavy .....	26
4.4 LabVIEW .....	26
4.4.1 Čelní panel .....	27
4.4.2 Blokový diagram.....	28
4.4.3 Popis ovládacích prvků .....	31
4.4.4 Popis zobrazovacích prvků .....	34
4.4.5 Popis podprogramů .....	36
<b>5. KONTROLNÍ MĚŘENÍ .....</b>	<b>40</b>
<b>6. ZÁVĚR .....</b>	<b>50</b>
<b>7. CITOVANÁ LITERATURA .....</b>	<b>52</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK A KONSTANT.....</b>	<b>53</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>54</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr 2.1 Rozdělení energie dopadající ze slunce.....	11
Obr 2.2 Fotoelektrický jev (pro kov).....	13
Obr 2.3 Princip funkce fotovoltaiického článku.....	14
Obr 3.1 Změna zobrazení segmentů při měření VA charakteristiky FV článků .....	15
Obr 3.2 Schémata zapojení fotovoltaiického článku .....	16
Obr 3.3 Standardní průběh VA a PV charakteristik fotovoltaiického článku .....	17
Obr 3.4 Vliv intenzity osvětlení na VA charakteristiku fotovoltaiického článku .....	18
Obr 3.5 Vliv teploty na VA charakteristiku fotovoltaiického článku.....	18
Obr 3.6 Vliv paralelního odporu na VA charakteristiku fotovoltaiického článku .....	19
Obr 3.7 Vliv sériového odporu na VA charakteristiku fotovoltaiického článku.....	19
Obr 3.8 Výpočet $R_s$ a $R_{sh}$ .....	20
Obr 4.1 Měření fotovoltaiického článku za tmy.....	22
Obr 4.2 Měření fotovoltaiického článku za světla.....	23
Obr 4.3 Schéma zapojení přepínače polarity.....	24
Obr 4.4 Plošný spoj a rozmístění součástek .....	25
Obr 4.5 Přepínač polarity.....	25
Obr 4.6 Schéma zapojení celé měřicí sestavy .....	26
Obr 4.7 Čelní panel obslužného programu.....	27
Obr 4.8 Blokový diagram hlavní programové smyčky měření za světla .....	30
Obr 4.9 Záložka nastavení přístrojů .....	31
Obr 4.10 Záložka ukládání .....	33
Obr 4.11 Záložka měření .....	34
Obr 4.12 Grafické indikátory průběhů proudu a napětí.....	35
Obr 4.13 Příklad podprogramového bloku pro čtení hodnot ze zdroje .....	36
Obr 5.1 VA charakteristika změřená ref. přístrojem a FV-Testerem při osvětlení halogenovou lampou napájenou ze sítě $E = 179\text{W/m}^2$ .....	41
Obr 5.2 Výkonová charakteristika změřená ref. přístrojem a FV-Testerem při osvětlení halogenovou lampou napájenou ze sítě $E = 179\text{W/m}^2$ .....	41
Obr 5.3 Vyhodnocení měření č.1 .....	42
Obr 5.4 VA charakteristika změřená ref. přístrojem a FV- Testerem při osvětlení halogenovou lampou napájenou z baterie $E = 475\text{W/m}^2$ .....	43

Obr 5.5 Výkonová charakteristika změřená ref. přístrojem a FV- Testerem při osvětlení halogenovou lampou napájenou z baterie $E = 475 \text{ W/m}^2$ .....	43
Obr 5.6 Vyhodnocení měření č.2 .....	44
Obr 5.7 VA charakteristika změřená 3x přístrojem FV- Testerem s časovou prodlevou 1h .....	45
Obr 5.8 Výkonová charakteristika změřená 3x přístrojem FV-TESTER s časovou prodlevou 1h .....	45
Obr 5.9 Vyhodnocení měření č.3 .....	46
Obr 5.10 Vývoj absolutní hodnoty odchylka měření .....	46
Obr 5.11 VA charakteristika změřená přístrojem FV- Testerem pro různé hodnoty intenzity stejnosměrného osvětlení.....	47
Obr 5.12 Výkonová charakteristika změřená přístrojem FV- Testerem pro různé hodnoty intenzity stejnosměrného osvětlení.....	48
Obr 5.13 Vyhodnocení měření č.4.....	48



## 1. ÚVOD

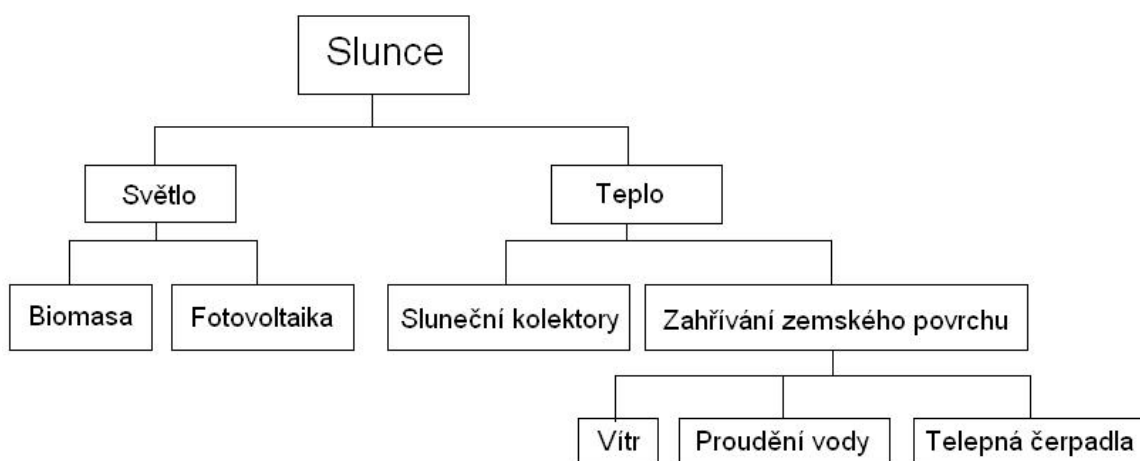
Celosvětová spotřeba energie každoročně stoupá. Neexistuje žádný nevyčerpatelný zdroj energie. Záleží na časovém intervalu pozorování, který definujeme. Slunce existovalo ještě před vznikem života na zemi a odhaduje se, že ještě několik miliard let existovat bude. Řekněme tedy, že z pohledu lidské existence, jej můžeme považovat za nevyčerpatelný zdroj energie.

Sluneční energie je nejdůležitějším zdrojem energie pro zemi. Sluneční paprsky dopadající na zemi se mění v energii větrnou, tepelnou a další. Dlouhé roky se sluneční energie ukládala v podobě fosilních paliv (ropa, uhlí, zemní plyn). Lidstvo spotřebovává fosilní paliva několikanásobně rychleji, než jsou tyto zdroje schopny se regenerovat. Proto se hledají alternativní „obnovitelné“ zdroje energie. Za alternativní zdroje energie můžeme považovat sluneční energii dopadající na povrch země, tepelnou energii země, větrnou energii, energii biomasy... atd. Tato práce je zaměřená na energii dopadající přímo ze slunce v podobě fotonů tzv.: fotovoltaika.

## 2. PŘEMĚNA SLUNEČNÍ ENERGIE

Pojem fotovoltaika pochází ze dvou slov, řeckého φως [pho s] = světlo a ze jména italského fyzika Alessandra Volty. [1]

Fotovoltaika je věda zabývající se procesem přeměny slunečního světla přímo na elektrickou energii za pomoci fotovoltaických článků. Fotovoltaický článek lze popsat jako polovodičovou diodu s velkou plochou PN přechodu.



**Obr 2.1 Rozdělení energie dopadající ze slunce**

### 2.1 HISTORIE FOTOVOLTAIKY

Historie fotovoltaiky sahá až do poloviny 19. století, kdy Alexander Edmond Becquerel, při experimentech s kovovými elektrodami ponořenými v elektrolytu zjistil, že elektrický proud se mění v závislosti na intenzitě osvětlení. První solární články měly účinnost kolem 1%. Albert Einstein na základě kvantové mechaniky pevných částic vysvětlil princip fotovoltaického jevu. Ve vývoji fotovoltaických článků byl také velice důležitý objev polského chemika Jana Czochralského, který vyvinul metodu výroby monokrystalického křemíku. Pomocí této metody se monokrystalický křemík pro fotovoltaické články vyrábí dodnes. [2]

Fotovoltaické články se až do ropné krize v sedmdesátých letech vyskytovaly ojediněle. Využívaly se hlavně k napájení vesmírných družic a pro vědecké účely. Od sedmdesátých let vlády investovaly nemalé peníze do rozvoje alternativních zdrojů

energie. Při rozvoji fotovoltaiky také jistou úlohu sehrál rozvoj křemíkových polovodičových součástek, tzn.: levnější výroba křemíku. [3]

Vývoj fotovoltaických článků se v literatuře rozděluje do třech generací. První generace se vyznačuje vysokou účinností a vysokou cenou. Řadí se sem články z krystalického křemíku. Druhá generace článků je charakteristická nízkou cenou a nízkou účinností. Řadí se sem tenkovrstvé články (amorfni Si, SiGe, CdTe), CIS struktury a organické články. Třetí generace článků se snaží dosáhnout vysoké účinnosti, ale zachovat nízké náklady. Patří sem články tandemové (více přechodů na sobě, každý z nich absorbuje jinou vlnovou délku), články s vícenásobnými pásy, termofotovoltaické články, termofotonické články, prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy, články využívající kvantových jevů a organické články na bázi objemových heteropřechodů. Všechny tyto technologie jsou ve stádiu vývoje, pouze tenkovrstvé články se již komerčně vyrábějí. [1]

V dnešní době je fotovoltaika velice perspektivní a masivně se rozvíjející odvětví uplatňuje se v průmyslu i v domácnostech a na všech místech kde je neekonomické stavět rozvodné elektrické sítě. Praktické využití je velice široké, od zařízení s výkonem několik miliwatt jako jsou kalkulátory, větráčky napájené solárním článkem, přes zařízení středního výkonu řádu několika kilowatt, například pro pokrytí spotřeby domu, pohon automobilu až po fotovoltaické elektrárny s výkonem stovek až tisíců kilowatt. Účinnost fotovoltaických článků se u různých typů liší (monokrystalické, polykrystalické, tenkovrstvé, polymerové, organické a další). Účinnost se běžně pohybuje mezi 4-25%, v laboratorních podmínkách již přesáhla hranici 42%.

## **2.2 FOTOELEKTRICKÝ JEV**

Fotoelektrický jev objasnil Albert Einstein ve své teorii o fotoelektrickém jevu. Pro objasnění jevu řekněme:

- 1) Elektromagnetické záření je při interakci s látkou vyzařováno a pohlcováno po jednotlivých (nedělitelných) kvantech, nazývaných fotony.
- 2) Při fotoelektrickém jevu předává každý foton svou energii vždy jen jednomu elektronu [4]

Tyto věty jsou stěžejní pro pochopení fotoelektrického jevu.

Energie fotonu:

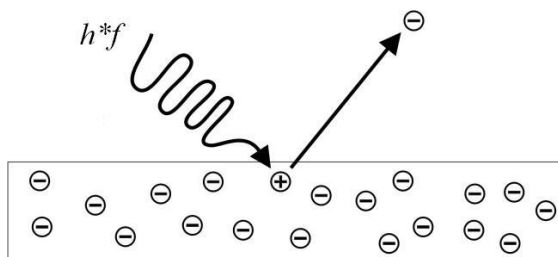
$$(2.1) \quad E = h * f \Rightarrow h \frac{c}{\lambda}$$

$h$ ...planckova konstanta

$f$ ...frekvence záření

$c$ ...rychlost světla

$\lambda$ ...vlnová délka



**Obr 2.2 Fotoelektrický jev (pro kov)**

Vzhledem k tomu, že planckova konstanta a rychlost světla jsou konstantní, energie fotonu závisí pouze na vlnové délce záření.

Dopadem fotonu na kov se z něj emituje elektron. Elektron je uvolněn, pokud kinetická energie dopadajícího fotonu je větší nebo rovna energii zakázaného pásu.

$$(2.2) \quad E_{fot} \geq E_g$$

$E_{fot}$  ... energie fotonu

$E_g$  ... energie zakázaného pásu (min. energie potřebná k emitování el.)

Pokud je tato podmínka splněna, foton předá elektronu svou kinetickou energii, která je zmenšena o energii potřebnou k uvolnění tohoto elektronu z materiálu. [4]

$$(2.3) \quad E_{el} = E_{fot} - E_g$$

$E_{el}$  ... energie emitovaného elektronu

## 2.3 GENERACE A SEPARACE NÁBOJE

### Fotogenerace

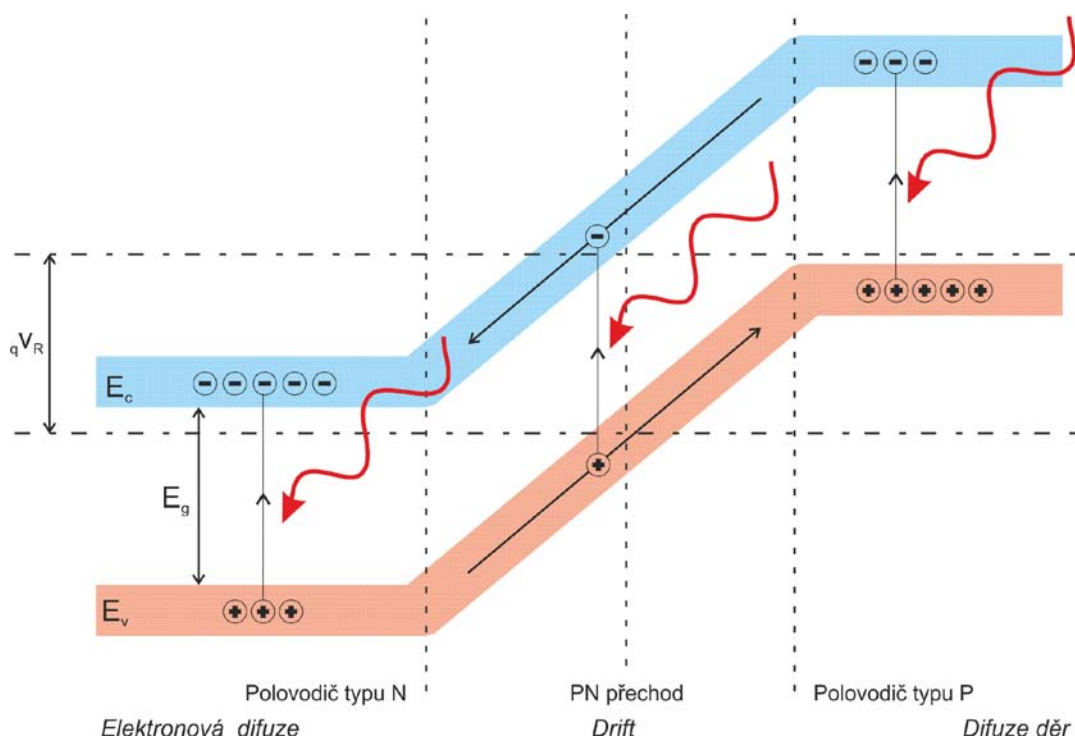
Fotovoltaické články jsou polovodičové diody s velkou plochou PN přechodu. Při dopadu fotonu na fotovoltaický článek mohou nastat tři jevy. Foton narazí na materiál a dojde k odrazu do okolí. Foton projde skrz celý materiál a nenarazí do žádného elektronu.

V obou těchto případech nedojde ke generaci páru elektron-díra. Pokud foton (s energií vyšší než energie zakázaného pásu) narazí do elektronu, předá mu veškerou svou energii a ten přeskóčí do valenčního pásu. Energie elektronu, která je vyšší než šířka zakázaného pásu se přemění na teplo. Ve valenčním pásu zůstane po elektronu díra, je vytvořen pár elektron-díra. [5]

Maximální proudová hustota je dána počtem fotonů dopadajících na fotovoltaický článek s energií vyšší než energie zakázaného pásu. Čím menší je energie zakázaného pásu, tím větší je proudová hustota. Se zvyšující se energií zakázaného pásu se snižuje pravděpodobnost, že vytvořený pár elektron-díra spontánně zanikne. Kompromisem je zvolení šířky zakázaného pásu od 1,1eV. [6]

### Nábojová separace

Vytvořený pár elektron-díra je potřeba rozdělit (separovat). Vnitřním elektrickým polem PN přechodu je přitahován elektron do oblasti N a díry do oblasti P. Elektrony dále pokračují přes vnější elektrický obvod směrem ke spotřebiči. Ideální velikost zakázaného pásu pro celkovou energetickou konverzi je asi 1,5eV. [6]



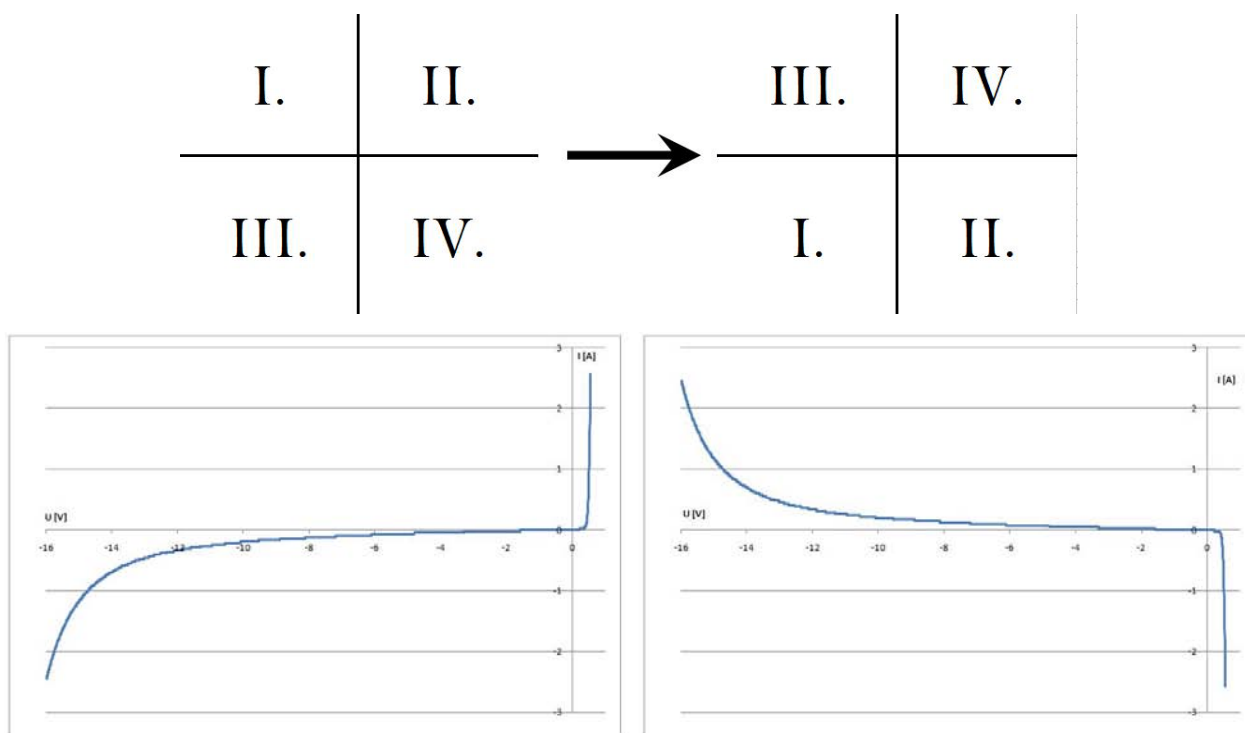
**Obr 2.3 Princip funkce fotovoltaického článku**

### 3. VA CHARAKTERISTIKY

#### 3.1 ZPŮSOB MĚŘENÍ

Fotovoltaický článek je z elektrotechnického pohledu dioda s velkou plochou PN přechodu. Pokud je článek neosvětlen lze jej připojit ke zdroji napětí a měřit VA charakteristiku jako u běžné diody (budeme nazývat měřením za tmy). Když je fotovoltaický článek osvětlen, dochází v něm ke generaci volných nosičů (v dalším textu bude nazýváno měřením za světla).

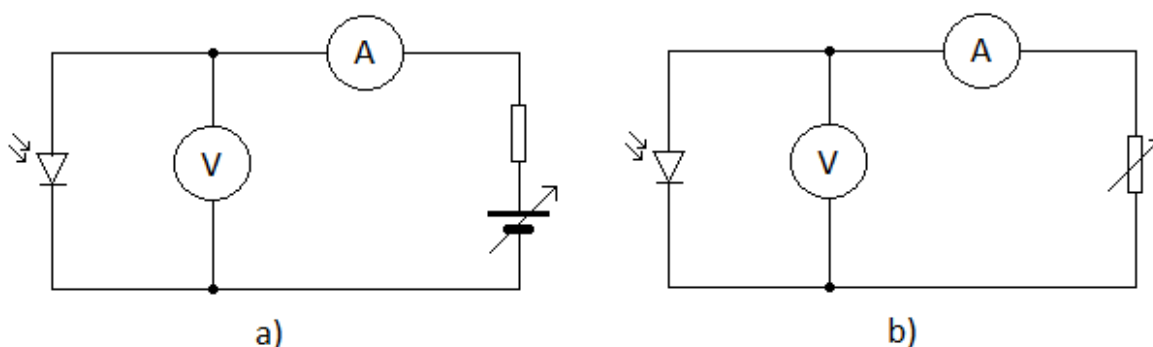
Použije-li se klasické zobrazení VA charakteristiky diody (Obr 3.1 levá charakteristika), pak se stává zajímavým III. a IV. kvadrant. Dioda na rozdíl od fotovoltaického článku nemá schopnost dodávat proud, proto se VA charakteristika fotovoltaického článku zdánlivě invertuje kolem napěťové osy. Grafické znázornění tohoto principu je na Obr 3.1



**Obr 3.1 Změna zobrazení segmentů při měření VA charakteristiky FV článků**

V případě, že je fotovoltaický článek měřen za světla, objevují se dvě možnosti, jak změřit IV. kvadrant VA charakteristiky. Článek zatížíme odporovou dekádou, budeme

měnit odpor dekády a v obvodu měřit napětí a proud Obr 3.2 b). Druhá možnost je použít zdroj, který je zapojen proti fotovoltaiickému článku. Do obvodu je vhodné vložit pomocný odpor, na kterém se bude vyrobená energie spotřebovávat, tím se usnadní práce se zdrojem. Plynule budeme měnit napětí na zdroji a měřit proud a napětí v obvodu. Zapojení je na Obr 3.2 a). Tato metoda umožňuje změřit III. a IV. kvadrant VA charakteristiky, oproti předešlé metodě, kde bylo možné měřit pouze IV. kvadrant.



**Obr 3.2 Schémata zapojení fotovoltaiického článku**

## 3.2 DŮLEŽITÉ PARAMETRY

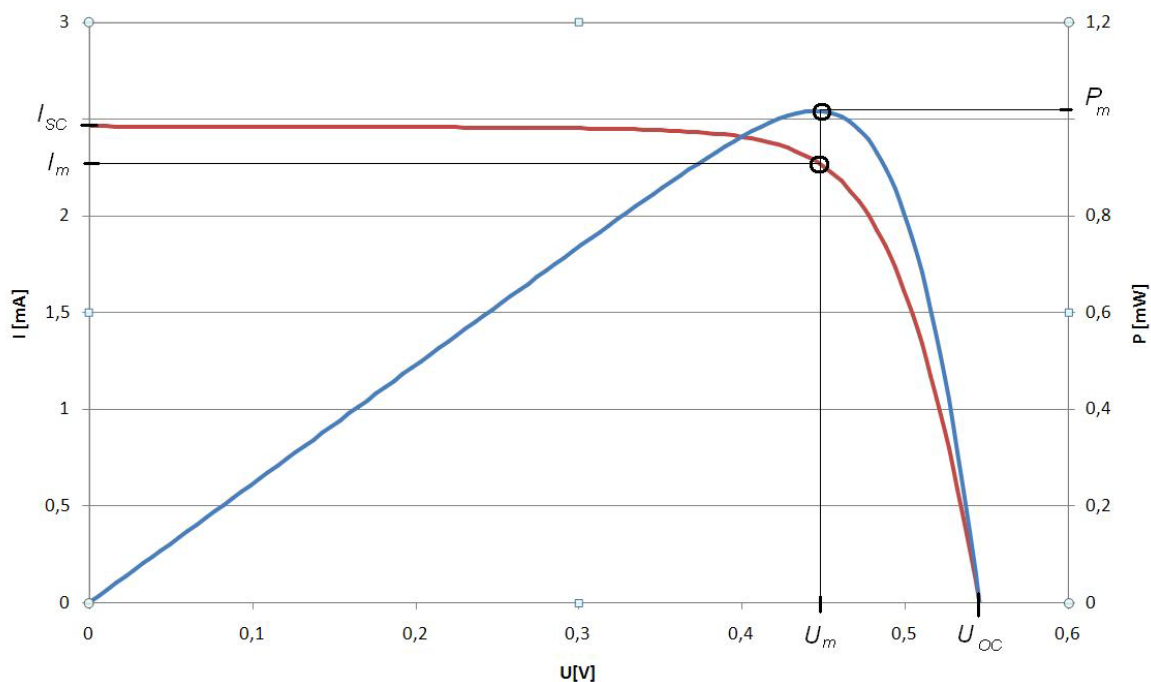
Jak již bylo zmíněno, pro účely fotovoltaiiky je nejpodstatnější IV. kvadrant VA charakteristiky, proto se další text bude zabývat především tímto kvadrantem. Hodnoty pro tvorbu následujících grafů, byly získány ze simulace vytvořené programem Solar200.vee<sup>1</sup>, který vypočítává hodnoty VA charakteristik pomocí dvoudiodového modelu fotovoltaiického článku.

Standardní průběh VA a PV charakteristik lze vidět na Obr 3.3. Parametry důležité při měření článků jsou proud nakrátko  $I_{sc}$ , napětí naprázdno  $U_{oc}$  a maximální výkon  $P_m$ . Proud  $I_m$  a napětí  $U_m$  nejsou maximální hodnoty proudu a napětí, ale jsou to hodnoty proudu a napětí při maximálním výkonu článku.

Pro maximální výkon platí:

$$P_m = U_m * I_m < U_{oc} * I_{sc} \quad (3.1)$$

<sup>1</sup> Program vytvořen Ing. Petrem Křivíkem, Ph.D., používaný v laboratorním cvičení z předmětu MOZE



**Obr 3.3 Standardní průběh VA a PV charakteristik fotovoltického článku**

Další parametry článku jsou účinnost  $\eta$  a fill factor (faktor plnění) FF. Faktor plnění je kvalitativním kritériem fotovoltického článku. Vyjadřuje, jak moc se VA charakteristika blíží k pravému úhlu. Hodnota je vždy menší než 1, typicky 0,75-0,85. [12]

$$(3.2) \quad FF = \frac{P_m}{U_{oc} * I_{sc}} = \frac{U_m * I_m}{U_{oc} * I_{sc}}$$

Účinnost je obvykle určena na základě standardních testovacích podmínek (Intenzita osvětlení  $1000 \text{ W/m}^2$ ; AM 1,5; Teplota  $25^\circ \text{C}$ ) a je dalším kvalitativním kritériem fotovoltického článku. [7]

$$(3.3) \quad \eta = \frac{P_m}{E * S} = \frac{FF * U_{oc} * I_{sc}}{E * S}$$

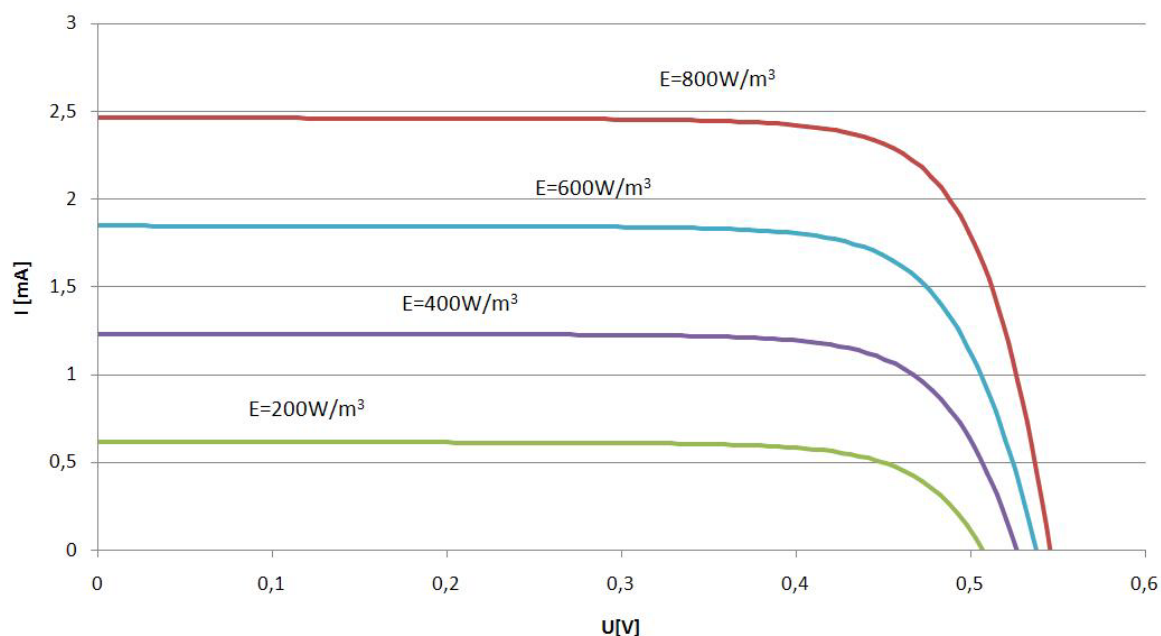
E...intenzita záření

S...plocha fotovoltického článku

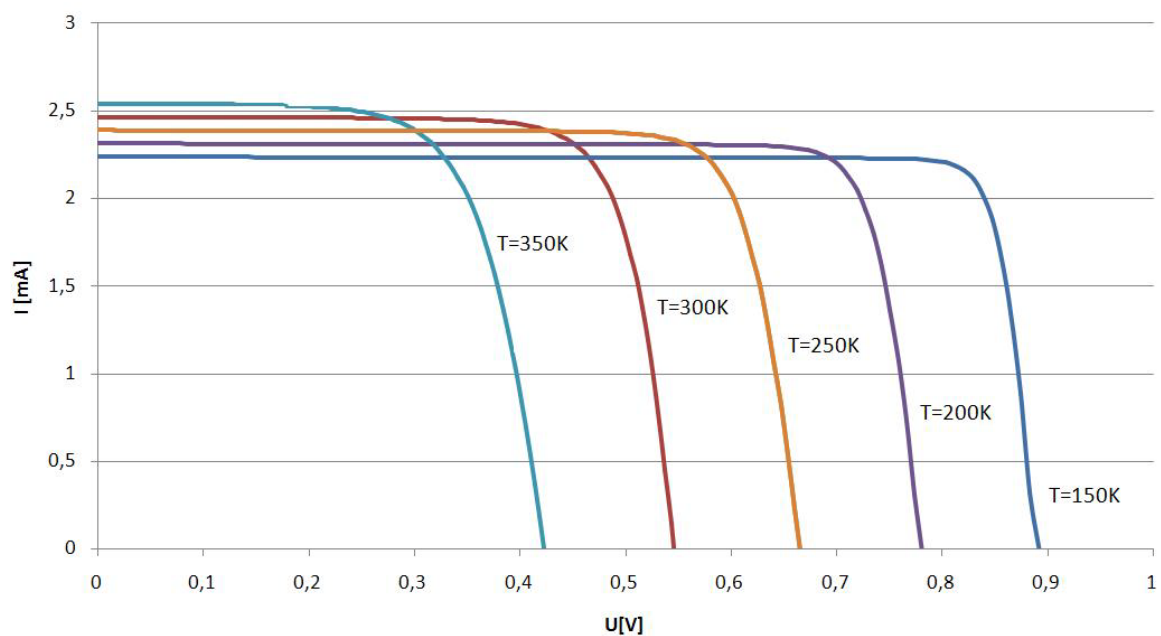
Základní faktory ovlivňující VA charakteristiku fotovoltického článku jsou teplota, intenzita osvětlení, sériový a paralelní odpor. S rostoucí intenzitou osvětlení roste



proud nakrátko, napětí naprázdno se téměř nemění. Naopak tomu je u teploty, kdy s rostoucí teplotou roste napětí naprázdno, proud nakrátko se téměř nemění.



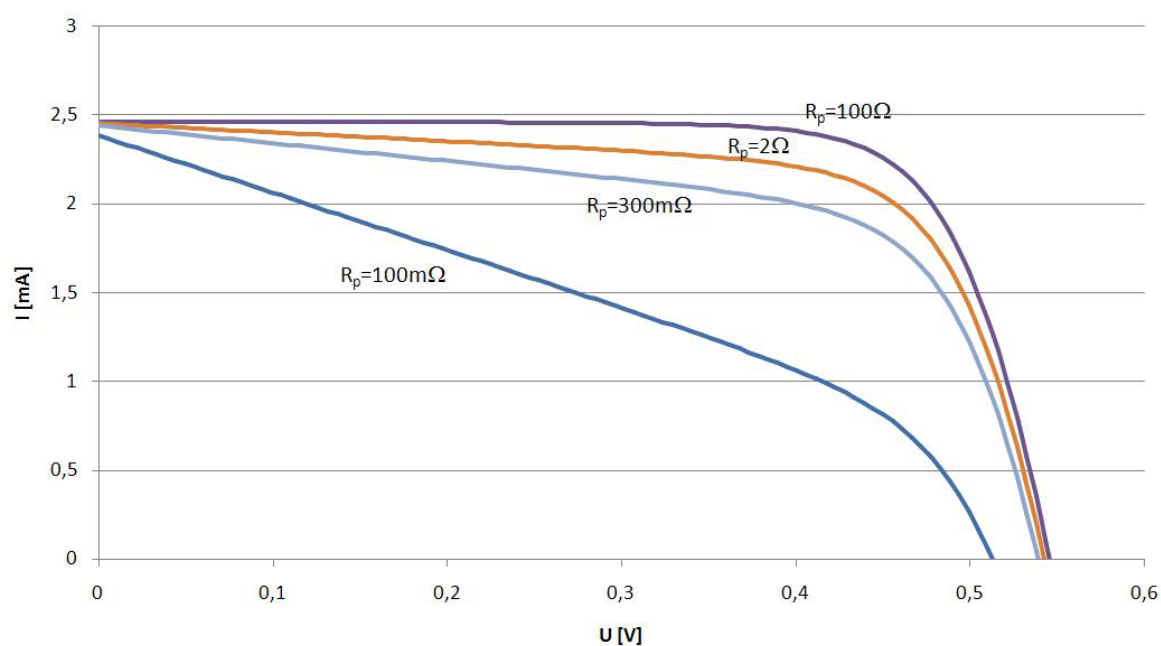
**Obr 3.4 Vliv intenzity osvětlení na VA charakteristiku fotovoltaického článku**



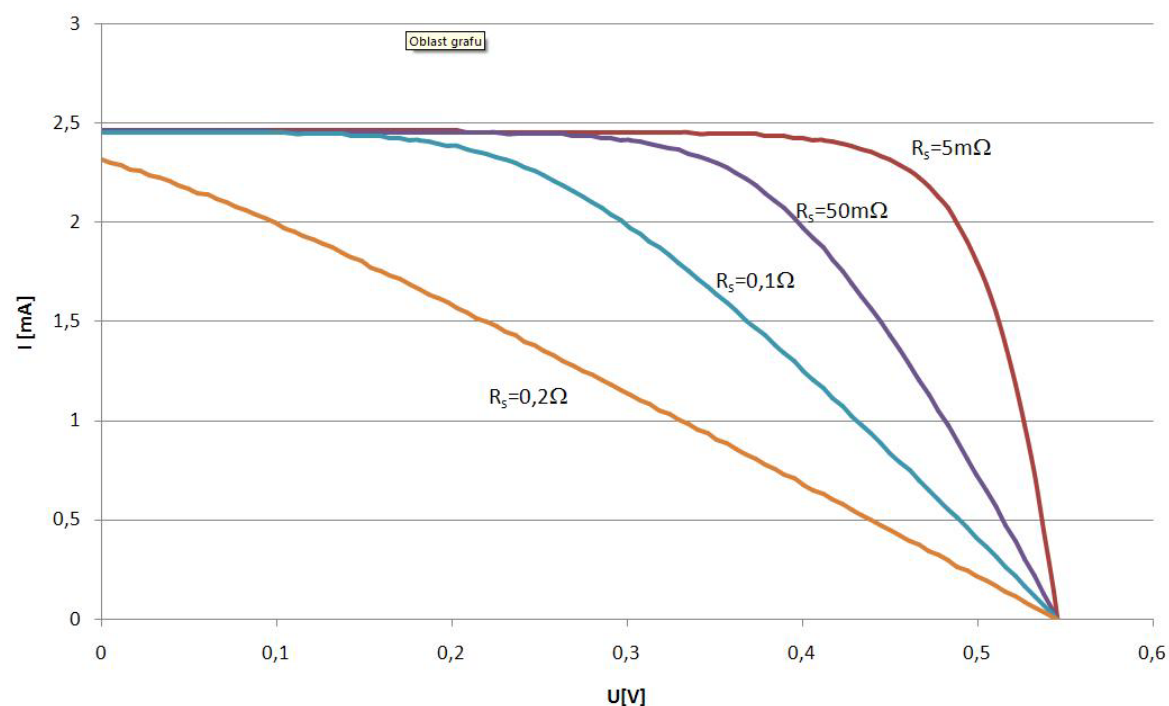
**Obr 3.5 Vliv teploty na VA charakteristiku fotovoltaického článku**

Paralelní odpor  $R_p$  ( $R_{sh}$ ) se běžně pohybuje v řádu desítek až stovek ohmů a popisuje svodový proud na okraji článku.

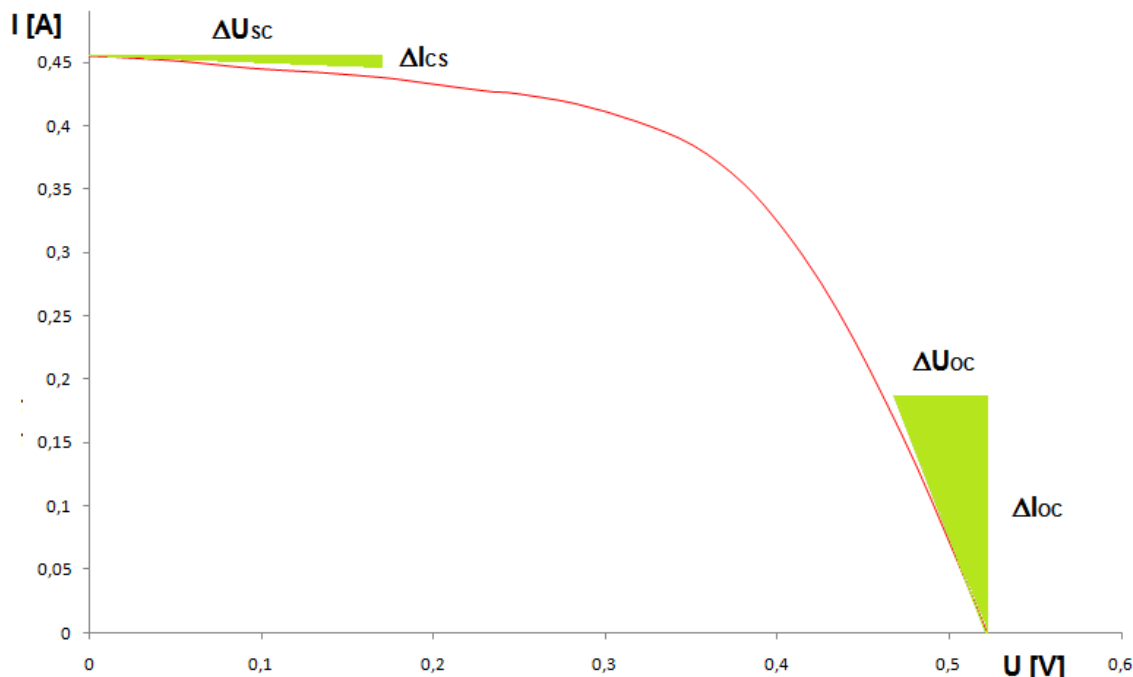
Sériový odpor  $R_s$  je v řádech setin ohmů a je sestaven z více dílčích odporů. Představuje odpor na zadním přechodu kov-polovodič, odpor substrátu P, plošný odpor substrátu N, horní kontaktní odpor, mřížkový odpor, sběrníkový odpor a odpor přívodních kabelů. [8]



**Obr 3.6 Vliv paralelního odporu na VA charakteristiku fotovoltaického článku**



**Obr 3.7 Vliv sériového odporu na VA charakteristiku fotovoltaického článku**



**Obr 3.8 Výpočet  $R_s$  a  $R_{sh}$**

Pro výpočet sériového odporu  $R_s$  a paralelního odporu  $R_{sh}$  lze použít metodu derivací za krajních podmínek. Nejprve je třeba vypočítat tečny v místech, kde VA charakteristika protíná proudovou a napěťovou osu, tedy v bodech  $I_{sc}$  a  $U_{oc}$ . Odpory pak odpovídají rovnicím [9]:

$$(3.4) \quad R_{sh} = \frac{dU_{sc}}{dI_{sc}} \cong \frac{\Delta U_{sc}}{\Delta I_{sc}}; \quad R_s = \frac{dU_{oc}}{dI_{oc}} \cong \frac{\Delta U_{oc}}{\Delta I_{oc}}$$

$\Delta U_{sc}, \Delta I_{sc} \dots$  rozdíly dvou naměřených bodů (co nejvíce vzdálených) v lineární oblasti VA charakteristiky před kolenem

$\Delta U_{oc}, \Delta I_{oc} \dots$  rozdíly dvou naměřených bodů (co nejvíce vzdálených) v lineární oblasti VA charakteristiky za kolenem [9]

Tato metoda výpočtu není exaktní a slouží pouze pro orientační odhad hodnot paralelního a sériového odporu z grafu VA charakteristiky!

## **4. NÁVRH A REALIZACE PROGRAMU**

### **4.1 ZADÁNÍ**

Cílem praktické části je vytvořit program pro automatické měření VA charakteristik fotovoltaiického článku. Program je určen zejména studentům nižších ročníků, k praktickému měření v laboratořích. Program má být schopen změřit VA charakteristiku podle zadaných vstupních parametrů. Výstup bude zobrazen na čelním panelu, případně může být uložen do souboru.

### **4.2 ROZBOR PROBLEMATIKY**

K měření VA charakteristiky fotovoltaiického článku jsem vybral způsob měření pomocí zdroje, který bude zapojen proti fotovoltaiickému článku. Princip je popsán v kapitole 3.1, zapojení na Obr 3.2 a). K měření je zapotřebí V-metr, A-metr a proměnlivý zdroj.

#### **4.2.1 Přístroje**

V-metr a A-metr je nahrazen digitálním multimetrem Agilent 34401A (alternativně lze použít multimetr Agilent 34410A, nebo Agilent 34411A), který umožňuje měřit proud i napětí. Přístroj je schopen měřit napětí do tisíce voltů, ale proud pouze do 3A. Poměrně malý proudový rozsah postačí ke změření jednoho článku, nikoliv však ke změření celého FV panelu. Veškeré specifikace přístroje naleznete v technické dokumentaci k přístroji viz.: [10]. Měření proudu a napětí se neprovádí ve stejný okamžik, ale pro naše účely postačí přepínání mezi měřením proudu a napětí. Přepínání mezi napěťovým a proudovým rozsahem bude mít za následek pomalejší měření.

Jako zdroj bude použit modul Agilent N6731B, zasunutý v mainframu Agilent N6700B. Výstupní napětí 0 – 5 V, výstupní proud do 10 A. Ostatní informace o přístroji naleznete v technické dokumentaci k přístroji viz.: [11]

U obou přístrojů bude komunikace s PC probíhat po sběrnici USB.

#### 4.2.2 Volba programového prostředí

Dalším úkolem byl výběr vhodného programového prostředí. Na výběr bylo ze tří možných programů: C++, Agilent VEE a National Instruments LabVIEW.

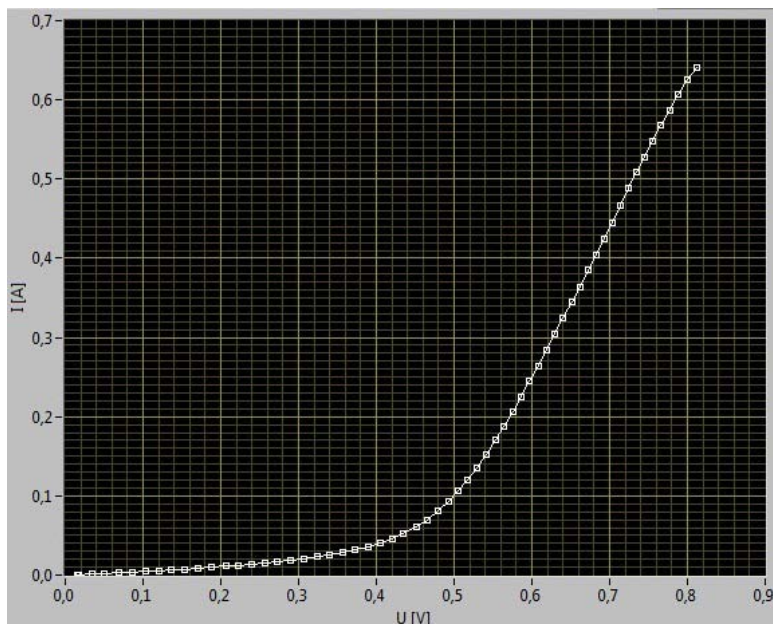
Bylo zvoleno programovací prostředí LabVIEW, ačkoliv oba měřicí přístroje jsou firmy Agilent technologies, s programem LabVIEW měl programátor již zkušenosti. LabVIEW využívá nestandardní způsob programování v jazyce „G“.

#### 4.2.3 Programové řešení

Měření je rozděleno do dvou hlavních částí: měření za světla a měření za tmy.

Měření za tmy se provádí při zastíněném neozářeném fotovoltickém článku. Článek se chová jako dioda a měření je totožné s měřením VA charakteristiky diody. Charakteristika se v grafu zobrazuje v segmentu I a II Obr 3.1.

Při měření nenastává problém s polaritou zdroje, jak uvidíme v případě měření za světla.



**Obr 4.1 Měření fotovoltického článku za tmy**

Měření za světla se naopak provádí při ozáření fotovoltického článku. V tomto případě se proud z článku přetlačuje s proudem ze zdroje. Měření VA charakteristiky není tak jednoduché. Na Obr 4.2 je levá polovina charakteristiky měřena při stejné polaritě zdroje jako při měření za tmy (zdroj pracuje souhlasně s fotovoltickým článkem). Bohužel levá část charakteristiky není dostačující, protože je to jen část

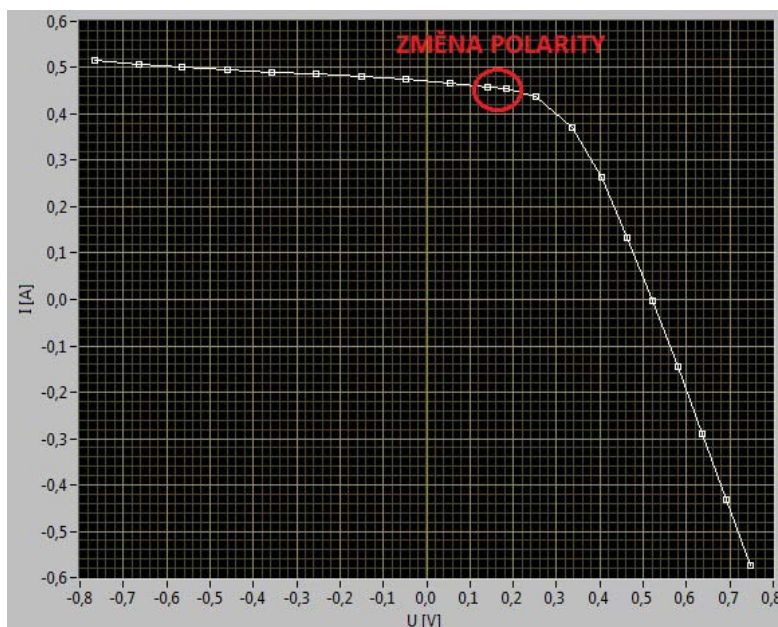
VA charakteristiky, která nemá vypovídací charakter. Pro změření celé charakteristiky je třeba změnit polaritu zdroje, takže zdroj bude působit proti fotovoltaiickému článku. Obě měření se poté sloučí do jednoho grafického průběhu.

K dispozici byl pouze zdroj agilent N6700B řiditelný pomocí USB s modulem N6731B, který má výstupní napětí 0-5 V. Pro změření celé V-A charakteristiky je potřeba zdroj s výstupním napětím nejméně  $\pm 3$  V. Tento problém je možné vyřešit dvěma způsoby. Výměnou za zdroj pokrývající obě polarity, nebo fyzickou změnou výstupních svorek stávajícího modulu N6731B.

Nákup nového kvalitního zdroje je finančně velmi náročný, proto byl zvolen způsob fyzické změny polarity modulu N6731B pomocí přepínače.

Přepínač je řízen přímo z LabVIEW. Program LabVIEW s přepínačem komunikuje přes pomocný digitální výstup zdroje N6700B. Výroba přepínače a jeho funkce jsou popsány v kapitole 4.3.

Při změně polarity může nastat odchylka od délky napěťového kroku. V tomto místě lze předpokládat malá chyba měření do 0,1% z přírůstku proudu. Chybu je při dostatečně jemném napěťovém kroku možné zanedbat.



**Obr 4.2 Měření fotovoltaiického článku za světla**

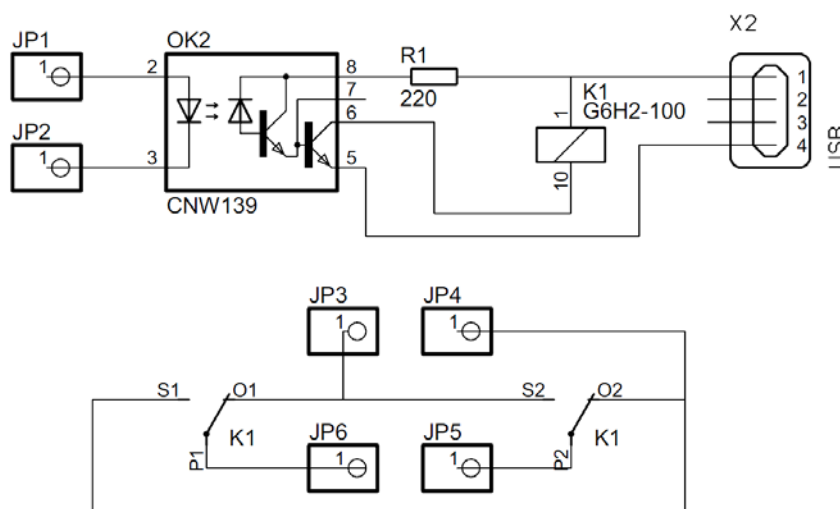


## 4.3 VÝROBA PŘEPÍNAČE POLARITY

Přepínač slouží k změně polarity modulu N6731B. Je připojený na PIN1 a PIN2 digitálního výstupu zdroje N6700B. Přepínač je řízen z programovacího prostředí LabVIEW pomocí speciálního podprogramu „Nastavení IO.vi“.

### 4.3.1 Popis funkce přepínače polarity

Digitální výstup zdroje N6700B připojeného na konektory JP1 a JP2 pomocí optočlenu OK2 přepíná relé K1. Optočlen zajišťuje galvanické oddělení řídicího obvodu od přepínače, aby nedošlo k poškození digitálního výstupu zdroje. Relé obsahuje dva přepínací kontakty a je napájeno z externího zdroje přes USB konektor. Zapojení je navrženo tak aby v jeden okamžik byly spojeny konektory JP3+JP6 a JP4+JP5, nebo JP3+JP5 a JP4+JP6.



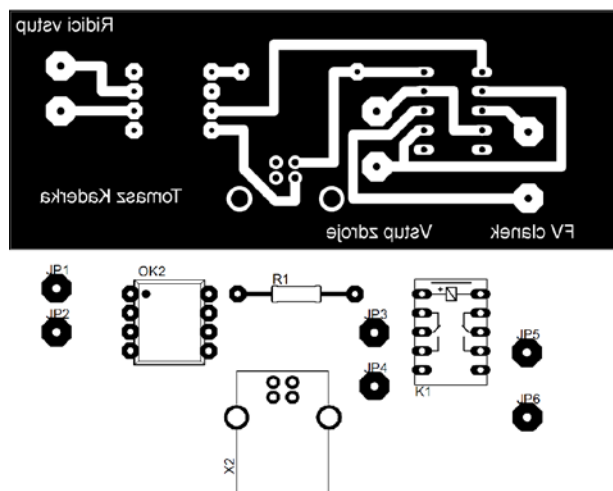
**Obr 4.3 Schéma zapojení přepínače polarity**

### 4.3.2 Seznam součástek:

R1	Odpor 220W
X2	USB konektor
OK2	Optočlen CNW 139
K1	Relé G6H2 3V
JP1-6	6 x panelová zdířka SBZ

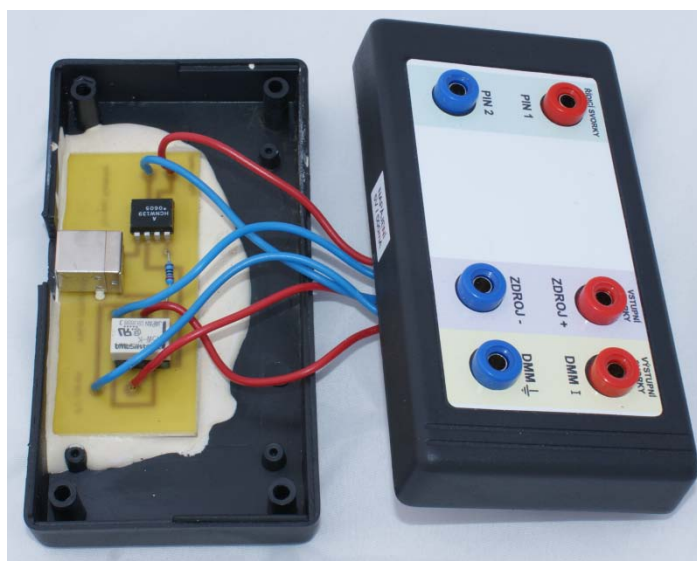
### 4.3.3 Plošný spoj

Plošný spoj byl navržen v programu Eagle 3.55. Při výrobě přepínače bylo možné přepínat svorky pomocí tranzistorů nebo relé. Snahou bylo minimalizovat možné ovlivnění měření. Proto bylo zvoleno přepínání pomocí relé. Výstup ze zdroje je zapojen přes optočlen. Přepínač je napájen přes USB konektor pro jeho univerzálnost a snadnou dostupnost. Zapojení je realizováno na jednostranném fotorezistentním plošném spoji.



Obr 4.4 Plošný spoj a rozmístění součástek

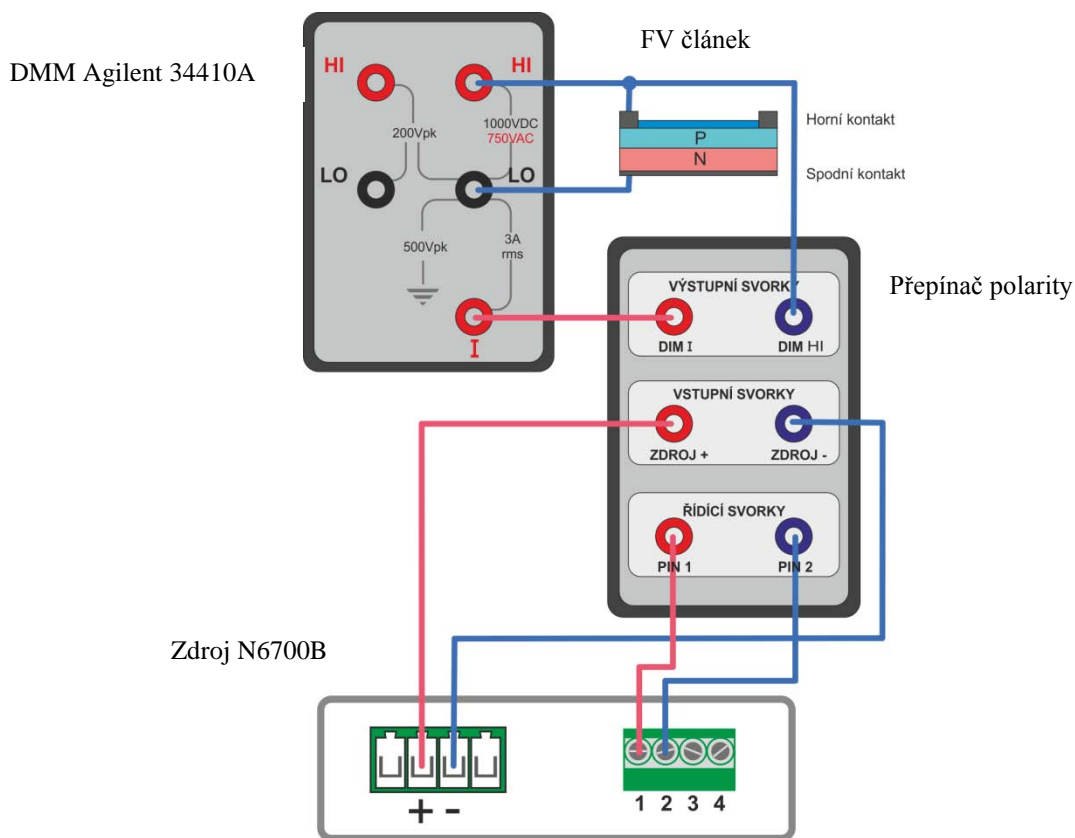
Osazená deska plošného spoje je v plastovém pouzdře o rozměrech 125x60x45mm, zalitá do epoxidové pryskyřice. Vodiče se připojují do panelových zdírek dle schématu zapojení na Obr 4.6.



Obr 4.5 Přepínač polarity



#### 4.3.4 Schéma zapojení celé měřicí sestavy



Obr 4.6 Schéma zapojení celé měřicí sestavy

## 4.4 LABVIEW

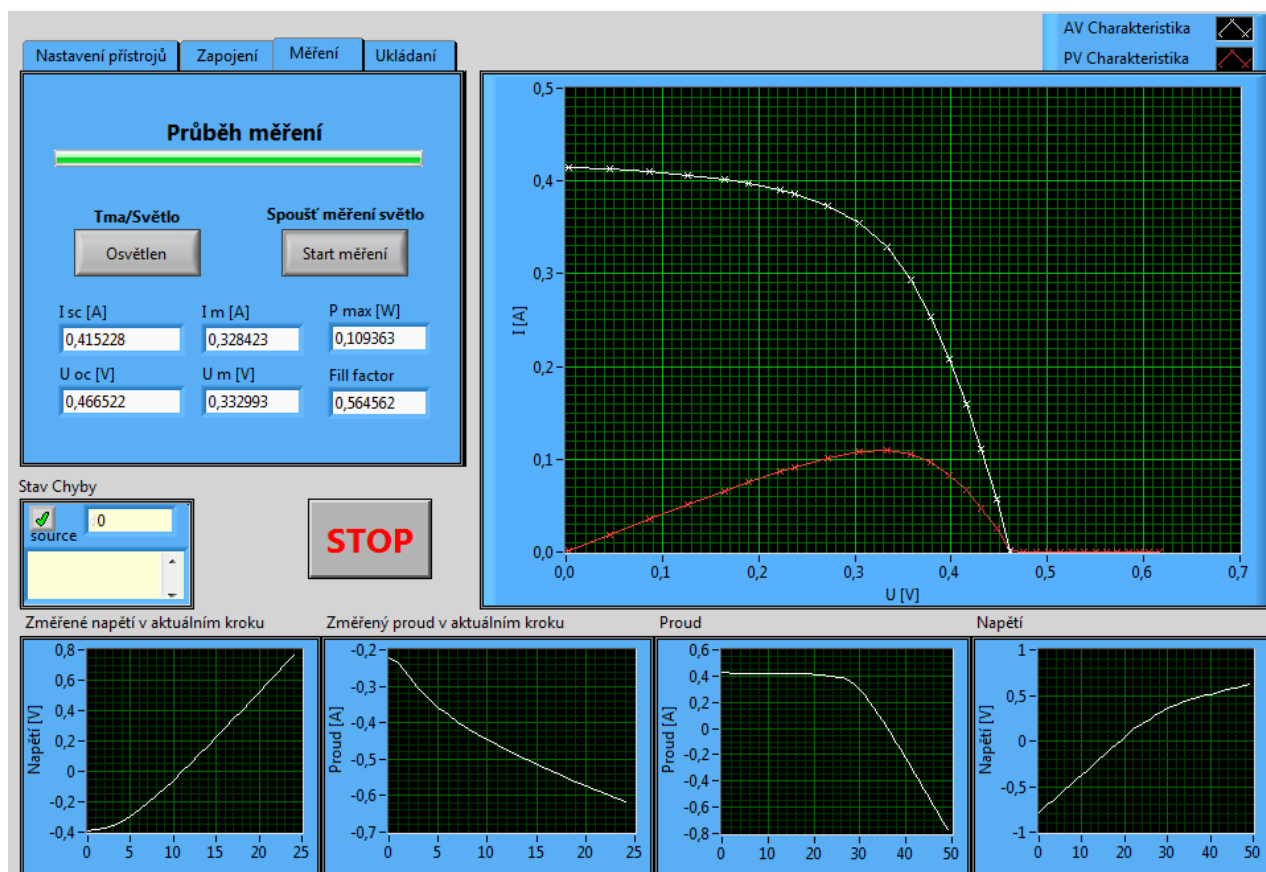
Při programování v LabVIEW se program skládá z čelního panelu GUI (grafického uživatelského rozhraní) a blokového diagramu.

Pro uživatele je nejdůležitější čelní panel. Jeho prostřednictvím se nastavují parametry měření, spouští a ukončuje měření. Indikuje se průběh měření a daným způsobem prezentují výsledky. Proto je kladen největší důraz na přehlednost, logické uspořádání a kvalitní popis. Dalšími důležitými prvky jsou: popis programu, vytvoření nápovědy a úprava designu.

Pro programátora je naopak důležitý hlavně blokový diagram. V blokovém diagramu se funkce programu realizují pomocí bloků zvaných „SubVI“. Jednotlivé bloky se mohou skládat z mnoha podbloků a ty zase z dalších podbloků. Stejným postupem se podbloky větví až k základní struktuře. Tento programátorský model je na jednu stranu velice přehledný, protože se programátor může podívat, z čeho se který blok skládá a

vytvářet si vlastní bloky, případně používat externě vytvořené bloky. Nevýhodou je, že základní struktura je neprůhledná, jsou zde pouze vstupy a výstupy a programátor se může pouze domnívat co se uvnitř děje.

#### 4.4.1 Čelní panel



**Obr 4.7 Čelní panel obslužného programu**

Čelní panel slouží ke komunikaci mezi uživatelem a programem. Přes čelní panel uživatel zadává programu instrukce, nastavuje parametry měření a získává zpětnou vazbu v podobě naměřených hodnot.

V levé části je umístěn prvek typu „tabulátor“, který obsahuje záložky. Jednotlivé záložky jsou popsány v kapitole (4.4.3 a 4.4.4). V pravé části je grafický indikátor, v němž se zobrazuje výsledná AV a PV charakteristika. Osy se nastavují automaticky, pro změnu stačí kliknout na číslo na konci osy a přepsat jej na požadovanou hodnotu. Ve spodní části jsou čtyři grafické indikátory ukazující celkový a dílčí průběh proudu a napětí. Podrobný popis bude následovat v kapitole 4.4.4, stejně jako popis stavu chyby.

#### 4.4.2 Blokový diagram

Hlavním prvkem je zde „event structure“. Struktura tohoto typu v režimu timeout vyčkává. Na základě událostí (např.: zmáčknutí tlačítka, instrukce z proměnné) umožňuje spustit sekvenci příkazů. Po vykonání příkazů se vrátí zpět do režimu timeout.

V této struktuře jsou čtyři možné události, každá z nich reaguje na změnu hodnoty jiného tlačítka:

1. Tma/Světlo
2. Zápis
3. Vytvoření cesty
4. Spoušť měření tma
5. Spoušť měření světlo
6. Konec měření

**Tma/světlo** zviditelní/zneviditelní tlačítko „Spoušť měření tma“, naopak zneviditelní/zviditelní tlačítko „Spoušť měření světlo“ a zároveň se změní zapojení multimetru pomocí přepínače polarity.

**Zápis** zajišťuje vytvoření cesty k souboru, do kterého mají být uložena naměřená data. V případě, že uživatel nezadá cestu k souboru a zvolil si možnost manuálního vytvoření cesty, objeví se chybové hlášení a uživatel je vyzván k vytvoření cesty případně k zvolení automatického vytvoření souboru.

**Vytvoření cesty** podobně jako tma/světlo slouží k zneviditelnění a opětovnému zviditelnění tlačítka vytvoření cesty.

Pro pochopení možnosti 4 a 5, které realizují samotné měření a rozdílu mezi nimi, musím nejprve vysvětlit již dříve zmíněný pojem aktuální krok.

**Měření za tmy** je pouhé měření diody, u kterého není potřeba měnit polaritu zdroje pro proměření celé VA charakteristiky. V tomto případě je celé měření aktuálním krokem.

Při **měření za světla** je potřeba změnit polaritu zdroje pro proměření celé VA charakteristiky (vysvětlení v kapitole 4.2.3). Měření tedy probíhá dvakrát, nejprve polarita zdroje dle zapojení zobrazeného na čelním panelu. Měření první části VA charakteristiky proběhne a program si vyžádá změnu polarity zdroje. V tuto chvíli jsou v grafech zobrazující proudu a napětí aktuálního kroku hodnoty z prvního měření. Nyní přepínač polarity provede záměnu výstupních svorek zdroje. Program proměří druhou část VA charakteristiky a zobrazí aktuální hodnoty proudu a napětí z druhého měření. Poté

spojí obě měření do jednoho grafu (spojení probíhá maticově) a zobrazí je ve výsledném grafu VA charakteristiky. Zmíněné kroky proběhnou ve velice krátkém časovém intervalu. Uživateli se jeví, že měření probíhá kontinuálně.

Měření za tmy je programově podobné jako měření za světla. U měření za světla je navíc zvýšen počet opakování měření z jednoho na dvě, vytvořen požadavek na změnu zapojení a realizováno spojení dvou grafických průběhů. Pro měření za světla jsou vytvořeny podprogramy, které ze změřené VA charakteristiky vypočítají důležité parametry FV článku ( $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$ ,  $P_m$ ,  $I_m$  a  $U_m$ ) a PV charakteristiku, která se následně vykreslí do grafu společně s VA charakteristikou.

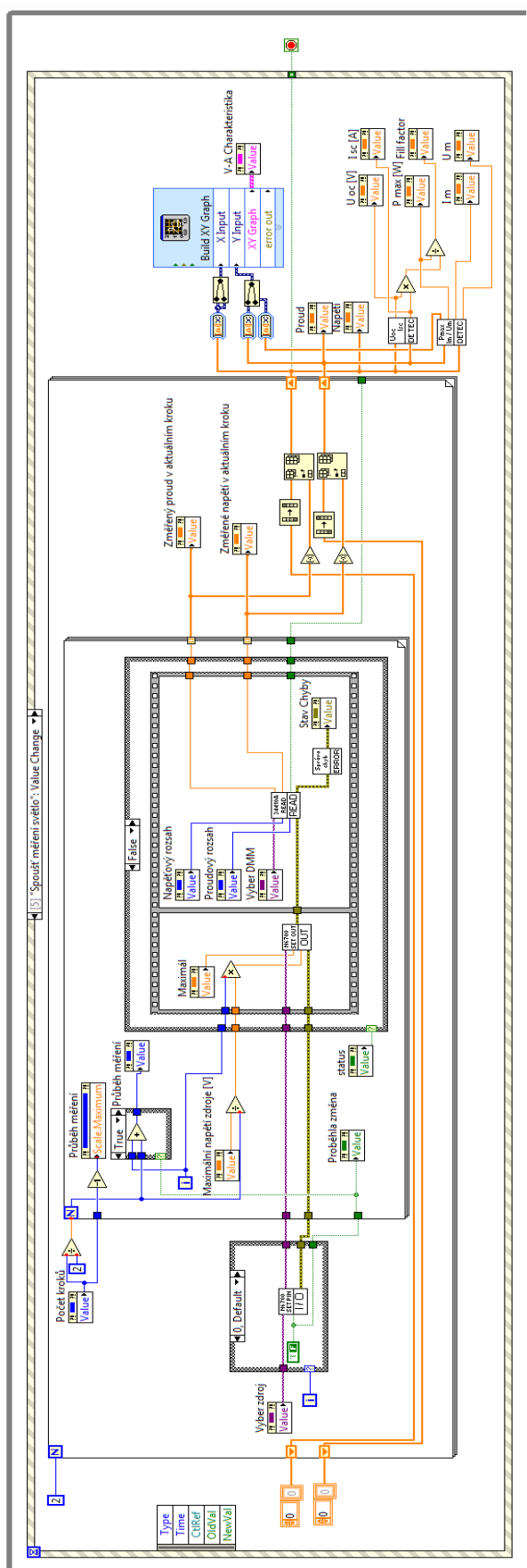
Měření za tmy i za světla pracuje na principu nastavování napětí zdroje a měření proudu a napětí fotovoltaického článku. Počet kroků měření určuje stejnojmenné tlačítko „Počet kroků“. Nastavování a měření se opakovaně děje ve smyčce typu „for“.

Pokud během měření nastane v některém z kroků chyba (např.: nepodaří se inicializovat zdroj, vyčíst hodnota z multimetru, nebo přístroj nahlásí překročení rozsahu) nastaví se příznak chyby a smyčka for doběhne již bez měření. Program se po dokončení cyklu automaticky vypne.

V průběhu měření není možno měnit žádné vstupní parametry, proto jsou všechna řídicí tlačítka s výjimkou tlačítka „STOP“ vyřazena.

**Konec měření** pouze nastaví hodnotu „true“ na ukončovací tlačítko smyčky „while“, která ukončí celý program.

Blokový diagram je velice rozsáhlý. Pro ilustraci jak programování v LabVIEW vypadá je na (Obr 4.8) smyčka „Spoušť měření světlo“. Kompletní smyčka „Spoušť měření světlo“ i s vstupními a výstupními proměnnými je uvedena v příloze C, pro větší přehlednost ve formátu A3.

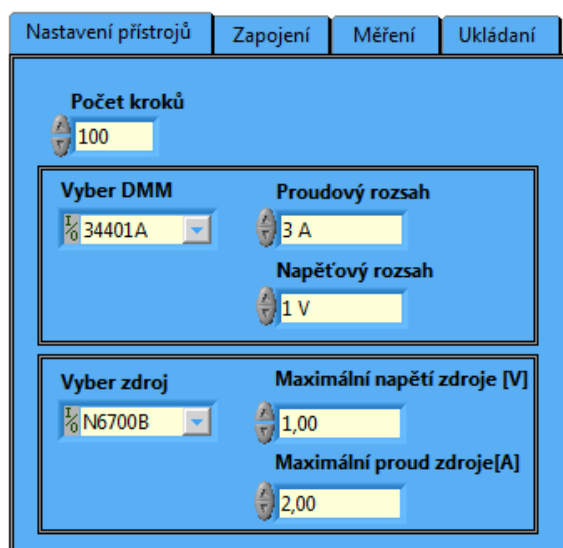


Obr 4.8 Blokový diagram hlavní programové smyčky měření za světla

#### 4.4.3 Popis ovládacích prvků

Ovládací prvky jsou umístěny v objektu typu „Tab Control“ v záložkách „Nastavení přístrojů“, „Měření“ a „Ukládání“. Záložka „Měření“ obsahuje také zobrazovací prvky. Mezi jednotlivými záložkami je možné přecházet pomocí kurzoru.

#### Záložka „Nastavení přístrojů“



**Obr 4.9 Záložka nastavení přístrojů**

- Počet kroků - program změří nastavený počet kroků. Musí být nastaveno celé číslo větší než deset. Při měření za světla se počet vzorků počítá pro obě polarity zdroje.
- Vyber zdroj - z připojených přístrojů musí uživatel vybrat zdroj. Program je vytvořen pouze pro zdroj Agilent série N6700 a to přímo pro modul Agilent N6731B. Pokud není přístroj v seznamu na výběr, není připojen k PC. Po drobné programové úpravě je možné tento program použít pro jiný modul ze série N6700.
- Vyber DMM - z připojených přístrojů musí uživatel vybrat multimetr Agilent 34401A, pokud není přístroj v seznamu na výběr, není připojen k PC.
- Proudový r. - jedná se o políčko typu výběr. Uživatel může vybrat z rozsahů 100  $\mu$ A až 3 A, také jsou zde možnosti Auto, Max a Min. Doporučeno je používat natrvalo rozsah 3 A. Nebudou se v grafu vytvářet schodky a nehrozí zničení multimetru.

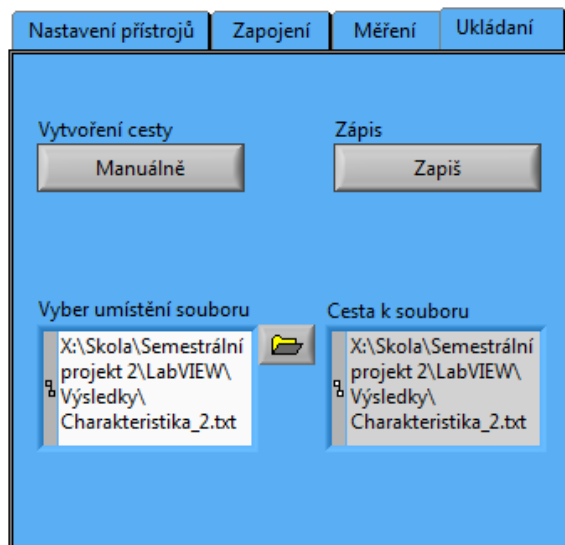
- |                         |  |
|-------------------------|--|
| Napěťový rozsah         | - podobně jako proudový rozsah. Na výběr je z rozsahů 100 mV až 1000 V, Auto, Max a Min. Doporučeno je používat rozsah 1 V.  |
| Maximální napětí zdroje | - defaultně nastaven 1 V, maximální nastavitelná hodnota je 5 V (omezeno zdrojem). Pokud je při měření použit předřadný odpor, úbytek napětí na tomto odporu se kompenzuje zvýšením napětí ze zdroje.  |
| Maximální proud zdroje  | - defaultně nastaveny 2 A, maximální proud zdroje je 10 A, ale tak vysoký proud by multimetr nevydržel, proto je maximální nastavitelná hodnota 3,2 A (omezeno programově). Přesto by při nastavování maximální hodnoty proudu měl být uživatel <u>velice opatrný!</u> |

### **Záložka „Měření“**

- |                            |   |
|----------------------------|---|
| Spoušť měření světlo (tma) | - pomocí tohoto tlačítka se spouští měření. V jeden okamžik může být na stejném místě zobrazeno buď „Spoušť měření za světla“ nebo „Spoušť měření za tmy“. Po spuštění měření není možné manipulovat s žádným z ovládacích prvků kromě tlačítka „konec měření“.   |
| Tma/Světlo                 | - toto tlačítko je pro program velice důležité. Plní celou řadu funkcí. Problematika měření za světla/tmy je probrána v kapitole 4.2.3, zde jsou vysvětleny pouze funkce tlačítka. Při zmáčknutém tlačítku je nastaveno měření za tmy, to způsobí skrytí tlačítka „Spoušť měření za světla“ a zviditelní se „Spoušť měření za tmy“. Pokud bude nastaveno měření za tmy, VA charakteristika se v grafu zobrazí jako charakteristika diody. V opačném případě se charakteristika zobrazí jako charakteristika fotovoltického článku jak bylo popsáno na Obr 3.1 |

Ostatní prvky záložky měření jsou popsány v kapitole 4.4.4.

### Záložka „Ukládání“



**Obr 4.10 Záložka ukládání**

- |                   |   |
|-------------------|---|
| Vytvoření cesty   | - výběr mezi automatickým a manuálním vytvořením cesty k souboru. Pokud uživatel zvolí možnost vytvoření cesty manuálně, musí nastavit umístění a název souboru. V případě, že uživatel nezadá příponu, program automaticky doplní „.txt“. Pokud uživatel zvolí možnost vytvoření cesty automaticky, nebude mít možnost nastavit cestu k souboru pomocí prvku „Vyber umístění souboru“. Relativní cesta je defaultně nastavena do adresáře, shodného s umístěním obslužného programu. Zde vytvoří složku výsledky a soubor nazve „Charakteristika_X.txt“, kdy „X“ je číslo souboru, který ještě neexistuje. |
| Výběr umístění s. | - pokud je zadáno manuální vytvoření cesty, slouží pro výběr umístění souboru.  |
| Zápis             | - po nastavení, případně vytvoření cesty k souboru kliknutím realizuje zápis, pokud při manuálním vytvoření cesty není zadána cesta k souboru, objeví se chybové hlášení a požadavek na vytvoření cesty k souboru.  |
| Cesta k souboru   | - zpětná vazba. Po zapsání hodnot do souboru se objeví název a umístění aktuálního souboru.   |



STOP

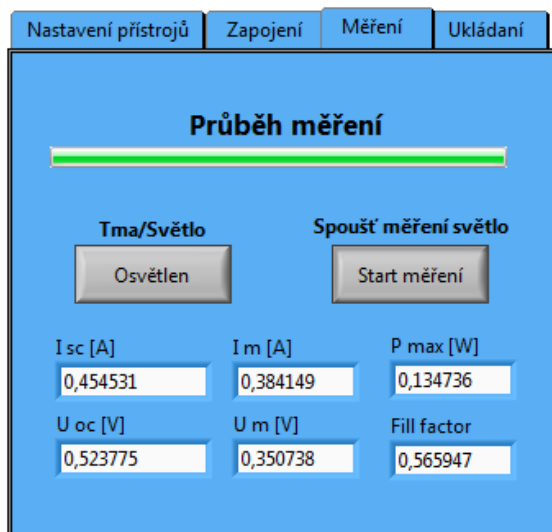
- pomocí tlačítka „STOP“ se program v nejbližší možné fázi ukončí.  
 Je to jediné tlačítko přístupné bez ohledu na aktuálně nastavenou záložku.

#### 4.4.4 Popis zobrazovacích prvků

##### Záložka „Zapojení“

Slouží pro informování uživatele jakým způsobem měřicí systém zapojit. Obsahuje schéma zapojení celého měřicího obvodu (FV článek, zdroj, DMM a přepínač). Zapojení je na Obr 4.6

##### Záložka „Měření“



**Obr 4.11 Záložka měření**

Průběh měření

- indikátor doby do konce měření. Je velice užitečný při delším měření, pokud uživatel nastaví velký počet kroků. V případě, že je měření odstartováno, indikátor se nemění a měření se automaticky neukončí, nastala chyba v programu. Je nutné ukončit program tlačítkem „STOP“.

$I_{sc}$  [A]

- indikátor zkratového proudu v ampérech

$U_{oc}$  [V]

- indikátor napětí na prázdko ve voltech

$P_{max}$  [W]

- indikátor maximálního výkonu ve wattech

$I_m$  [A]

- indikátor proudu při maximálním výkonu v ampérech

$U_m$  [V]

- indikátor napětí při maximálním výkonu ve voltech

Fill factor

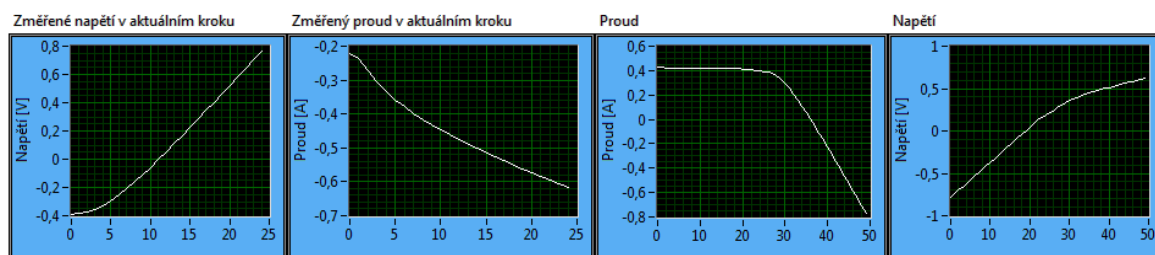
- indikátor faktoru plnění

### Stav chyby

Obsahuje indikátor chyby, položka typu true/false. V případě chyby se zobrazí její kód a v poznámce se vypíše zdroj chyby. Nejčastější chyby způsobené uživatelem jsou ošetřeny a vypíší se v českém jazyce s kódem 1-8, jako například nezapojený, nebo odpojený DMM či zdroj.

### VA charakteristika

V grafickém indikátoru se v případě měření za světla zobrazuje AV a PV charakteristika. V případě měření za tmy se zobrazuje pouze AV charakteristika, protože při měření za tmy se článek chová jako dioda a negeneruje žádný proud. Charakteristika je na obrázku Obr 4.7



**Obr 4.12 Grafické indikátory průběhů proudu a napětí**

### Změřený proud/napětí v aktuálním kroku

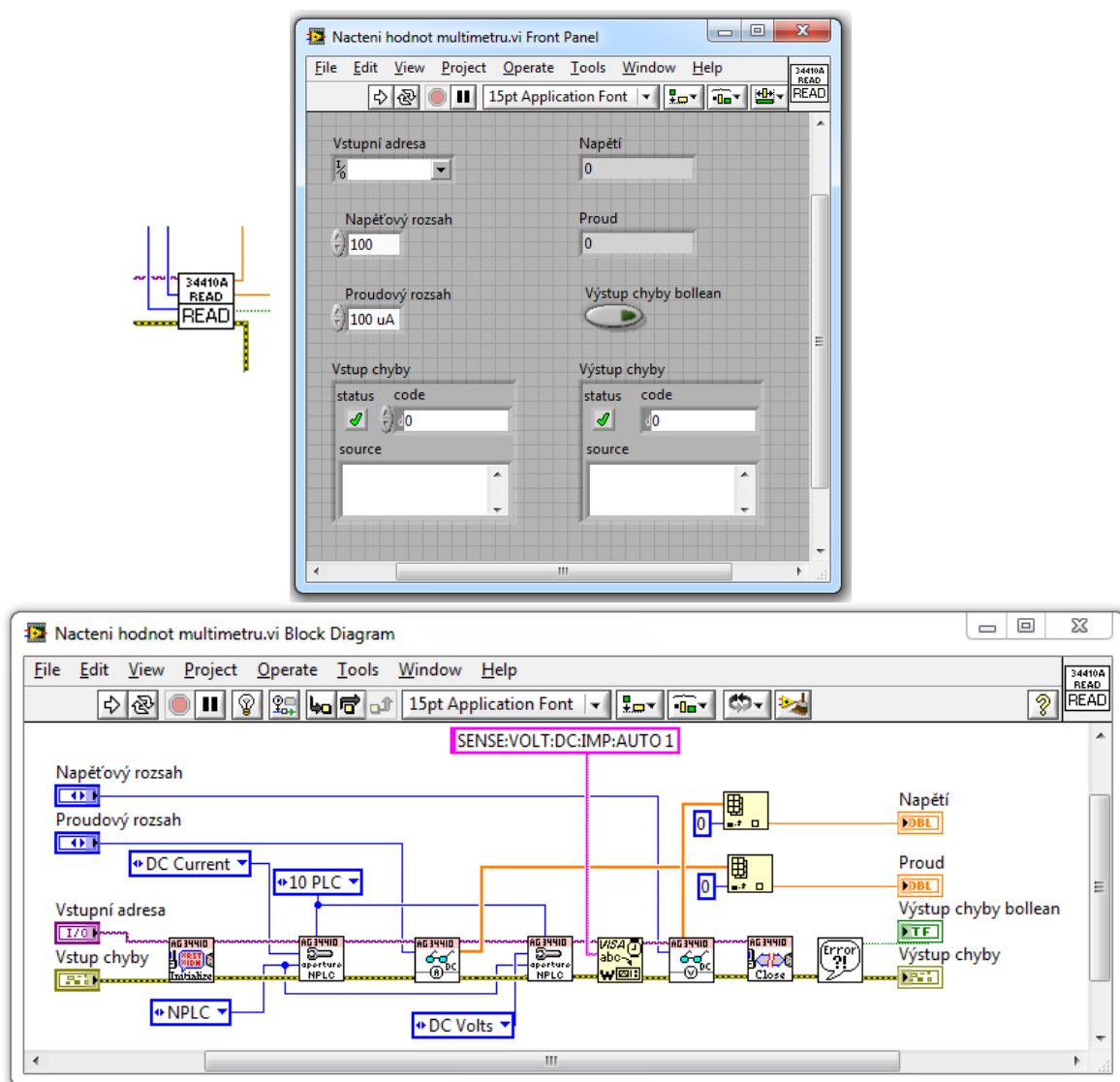
Grafické indikátory zobrazující aktuální průběhy změřené multimetrem. V případě skokové deformace některého z průběhu je potřeba překontrolovat rozsahy zdroje a multimetru (pouze pokud bylo s rozsahy multimetru manipulováno).

### Proud/napětí

Grafické indikátory zobrazující průběh proudu a napětí po ukončení celého měření. Lze si na nich ověřit, že všechny hodnoty jsou naměřeny správně. V případě, že by se v jednom z grafů změřená hodnota skokově změnila, pravděpodobně by se jednalo o chybu vyčítání hodnoty z multimetru, celou charakteristiku by bylo nutné změřit znovu.

#### 4.4.5 Popis podprogramů

Podprogramy jsou bloky vytvořené uživatelem pro zjednodušení obslužného programu, protože se dají použít ve více smyčkách najednou. Zamezí se tak zbytečnému zvětšování obslužného programu. Bloky by měly být vytvářeny co nejuniverzálněji, aby bylo možné je použít pro více aplikací. Každému bloku lze přiřadit ikonu, vstupy a výstupy. Grafická interpretace uživatelského bloku je na (Obr 4.13). Aby byly programy přehledné, vstupy se umísťují nalevo a výstupy napravo. V blokovém diagramu tok dat postupuje zleva doprava. Ikona může obsahovat libovolný obrázek (barevný nebo černobílý).



Obr 4.13 Příklad podprogramového bloku pro čtení hodnot ze zdroje

### **Nastavení IO.vi**

Vstupy: řídicí vstup, vstupní adresa, vstup chyby.

Výstupy: výstupní adresa, výstup chyby.

Slouží k nastavení digitálního výstupu zdroje Agilent N6700B, který následně pomocí přepínače změní polaritu analogového výstupu zdroje. Řídicí vstup je objekt typu „boolean“. Hodnota „True“ nastaví na PIN1 „0“ a PIN2 „1“, hodnota „false“ nastaví na PIN1 „1“ a PIN2 „0“.

### **Nastavení zdroje.vi**

Vstupy: nastavení max proudu zdroje, nastavení napětí, vstupní adresa, vstup chyby

Výstupy: výstup chyby

Slouží k nastavení analogového výstupu modulu N6731B. Spolu s blokem „nactení hodnot multimetru.vi“ jsou to nejdůležitější bloky v obslužném programu. Při každém průběhu smyčky měření se inkrementuje hodnota „nastavení napětí“, až do maximální hodnoty nastavené uživatelem. Velikost inkrementu je dána maximálním napětím a počtem kroků. Po nastavení parametrů zdroje, blok vyčká 100 ms, aby se výstup ustálil.

### **Nactení hodnot multimetru.vi**

Vstupy: vstupní adresa, napěťový rozsah, proudový rozsah, vstup chyby

Výstupy: napětí, proud, výstup chyby boolean, výstup chyby

Slouží k nastavení rozsahů a vyčítání hodnot z digitálního multimetru Agilent 34410A. Nejprve proběhne měření proudu a poté napětí. Multimetr při měření proudu i napětí hodnoty průměruje po dobu 10ms, tato funkce odstraňuje rozptyl hodnot při měření článku osvětleného střídavým zdrojem. Negativem této funkce je prodloužení doby měření.

### **Vykon.vi**

Vstupy: proud, napětí      Výstupy: P char, P max, I m, P m

Z pole hodnot proudů a napětí vypočte výkonovou charakteristiku, maximální výkon, proud a napětí při maximálním výkonu.

### **Detekce.vi**

Vstupy: proud, napětí      Výstupy: I sc, U oc

Z pole hodnot proudu a napětí vypočte proud nakrátko a napětí naprázdno.

Nejprve probíhá aproximace hodnot v blízkosti průsečíků s osou X a Y. Poté se vypočítá rovnice regrese. Tento krok je klíčový k přesnému stanovení proudu nakrátko a napětí naprázdno.

### **Ukládání**

Vstupy: proud, napětí, vyber umístění souboru, vytvoření cesty, vstup chyby

Výstupy: cesta k souboru, výstup chyby

Nejsložitější blok sloužící k ukládání naměřených hodnot. Hodnoty se ukládají do dvou sloupců, první sloupec napětí, druhý sloupec proud, oba s přesností na 6 desetinných míst. Jako oddělovací znak je použit tabulátor.

Blok se skládá ze dvou hlavních částí:

Sloučení dat a hlavičky – pole čísel formátu „double“ (proudu a napětí) převede na pole řetězců „stringů“. Na první řádek se vloží aktuální datum a čas. Druhý řádek je prázdný, na třetí se připojí nadpisy sloupců a jednotky.

Vytvoření cesty k souboru – jsou dvě možnosti jak vytvořit cestu. Automaticky nebo manuálně.

*Automaticky* – nejprve se detekuje cesta ke kořenovému adresáři, ve kterém je umístěn obslužný program. Tam vytvoří složku „výsledky“ (pokud neexistuje). Následně zjistí, jestli již existuje nějaký soubor. Pokud ano, vytvoří soubor s číslem o jedno vyšší.

*Manuálně* – uživatel sám zvolí umístění do již existující složky někde na disk a přiřadí mu název. Soubor se uloží s příponou „.txt“.

**Tab 4.1 Ukázka formátování uloženého souboru:**

Změřeno: 28.2.2011 16:37:02

Napětí [V]	Proud [A]
-0,523740	0,924122
-0,480626	0,923892
-0,440842	0,922849
-0,399077	0,921539
-0,359281	0,920334
.....	.....

### **Chybové hlášení.vi**

Vstupy: vstup chyby

Výstupy: výstup chyby

Slouží k informování uživatele o případné chybě a příčině této chyby v českém jazyce. Chybou může být např.: špatně zapojený nebo vůbec nezapojený zdroj nebo DMM.

V případě, že uživatel zmáčkne tlačítko „zapiš“, není zadána cesta k souboru a je zvolena možnost manuálního ukládání, program spustí dialogové okno s varováním, že není zadána cesta k souboru a požadavkem na provedení nápravných opatření.

## 5. KONTROLNÍ MĚŘENÍ

Pro zjednodušení bude obslužný program a soustava měřicích přístrojů nazýván „FV-Tester“. Jako referenční přístroj byl použit Solar Cell Tester

Pro ověření funkčnosti FV-Testeru byly provedeny čtyři kontrolní měření. První se zaměřuje na srovnání FV-Testeru a Solar Cell Testeru při měření FV článku osvětleného halogenovou lampou napájenou ze sítě 230V/50Hz. Druhé měření je zaměřeno na srovnání FV-Testeru a Solar Cell Testeru při měření FV článku osvětleného halogenovou lampou napájenou z baterie. Třetí měření srovnává změřené VA charakteristiky na přístroji FV-Tester s časovou prodlevou 1 h. Čtvrté měření je zaměřeno na srovnání VA a výkonových charakteristik pro různé hodnoty intenzity osvětlení, změřené na přístroji FV-Tester.

Z naměřených charakteristik testovaných FV článků byly vyjádřeny a spočítány parametry jako je proud nakrátko  $I_{sc}$ , napětí naprázdno  $U_{oc}$ , maximální výkon  $P_m$ , proud  $I_m$  a napětí  $U_m$  (v bodě maximálního výkonu). A dále byly spočítány orientační hodnoty sériového odpor  $R_s$  a paralelního odporu  $R_{sh}$  pomocí derivace za krajních podmínek, která již byla popsána v předchozí kapitole 3.2.

### Měření č.1:

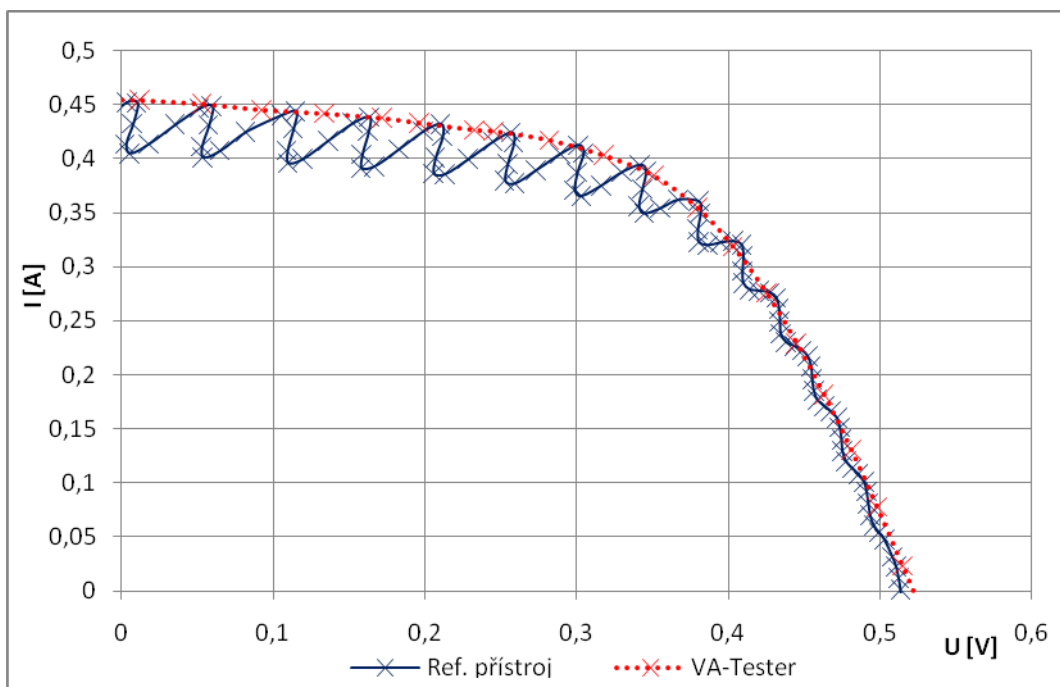
FV monokrystalický článek č.1 byl osvětlen halogenovou lampou napájenou ze sítě 230V/50Hz ze vzdálenosti 30 cm. Intenzita osvětlení dopadající na článek byla  $179 \text{ W/m}^2$ .

Nastavení FV-Testeru:

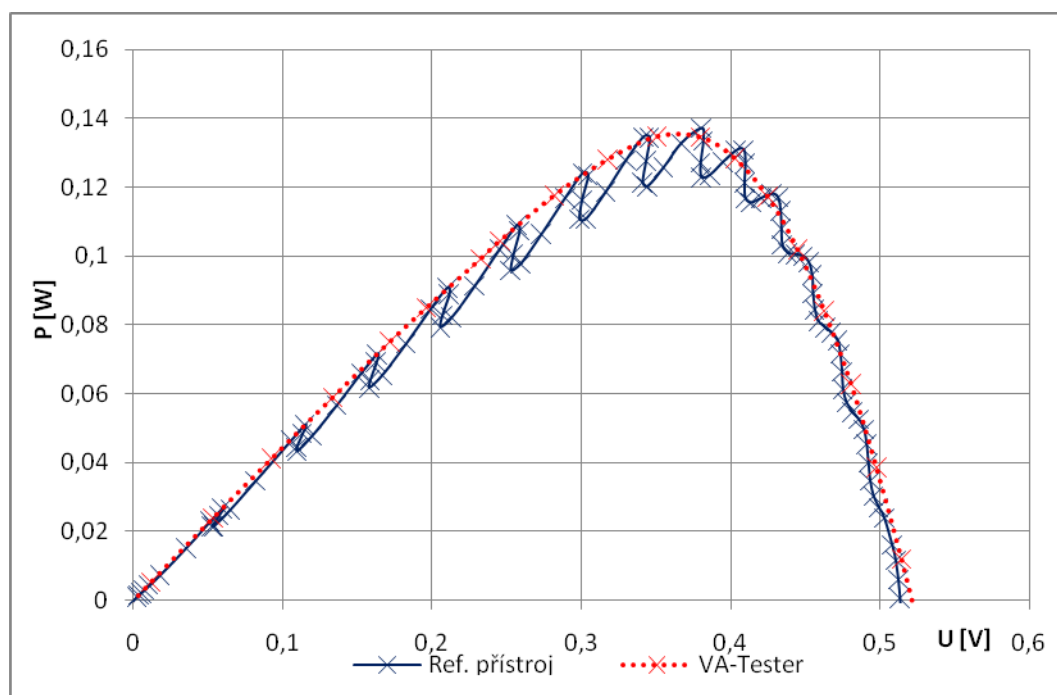
Počet kroků - 50; Proudový rozsah – 3 A; Napěťový rozsah – 100 V; Maximální proud zdroje – 2 A; Maximální napětí zdroje – 1 V

Z grafu na Obr 5.1 a Obr 5.2 je vidět nesporná výhoda FV-Testeru oproti Solar Cell Testeru, který měří aktuální hodnotu napětí a proudu pouze jednou. Agilent 34401A (multimetr zapojený v sestavě FV-Testeru) obsahuje funkci „integration time“ měří po dobu 167 ms a naměřené hodnoty průměruje. Pokud měříme FV článek osvětlený kmitajícím zdrojem světla, FV-Tester každou změřenou hodnotu zprůměruje, výsledkem je vyhlazená VA charakteristika. Nevýhodou je, že měření trvá déle. Doba měření na FV-Testeru se pohybuje od 5 – 100 s v závislosti na nastaveném počtu kroků. Experimentálně bylo zjištěno, že dostatečné vypovídací schopnosti se dosahuje při měření 50 kroků, kdy celkový čas měření je cca 22 s. Solar Cell Tester změří VA charakteristiku přibližně za 500 ms – 8 s.

Na obrázku je nejdůležitější IV. kvadrant VA charakteristiky, oba přístroje VA charakteristiku měří i do záporných hodnot napětí a proudu, ale pro účel prezentace výsledků není potřeba záporné hodnoty uvádět.



Obr 5.1 VA charakteristika změřená ref. přístrojem a FV-Testerem při osvětlení halogenovou lampou napájenou ze sítě  $E = 179\text{W/m}^2$



Obr 5.2 Výkonová charakteristika změřená ref. přístrojem a FV-Testerem při osvětlení halogenovou lampou napájenou ze sítě  $E = 179\text{W/m}^2$



### Vyhodnocení měření č.1:

**Tab 5.1 Důležité parametry měření č. 1**

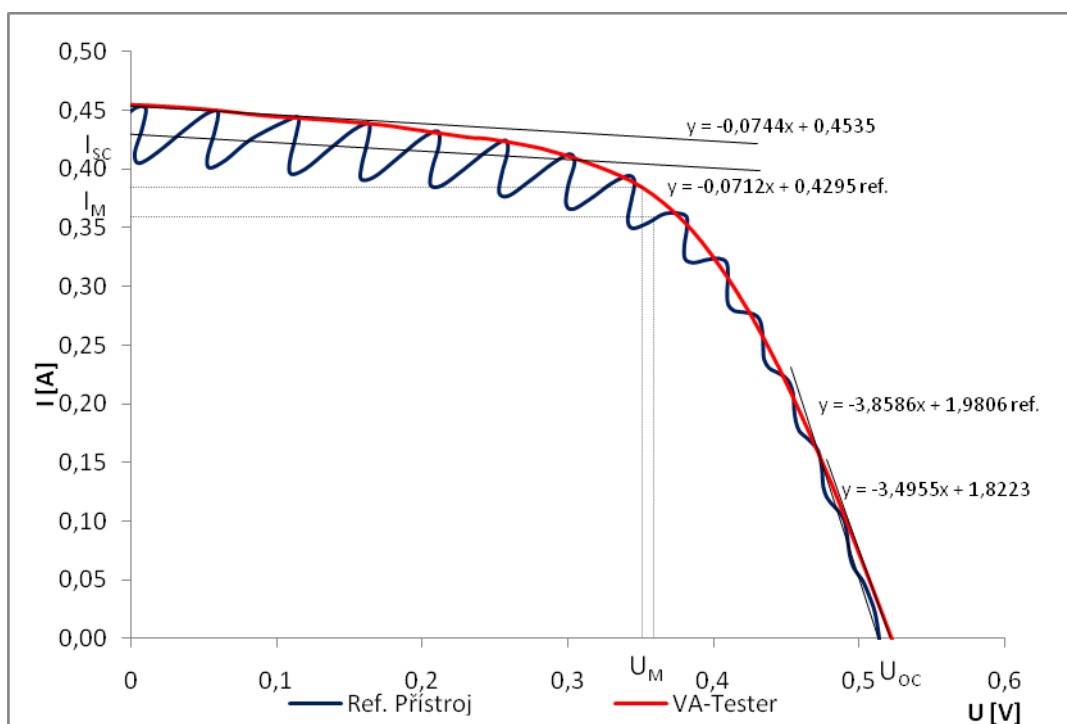
	$U_{OC}$ [V]	$I_{SC}$ [A]	$P_M$ [W]	$U_M$ [V]	$I_M$ [A]	FF [-]	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$R_{sh}$ [ $\Omega$ ]
SC Tester	0,5133	0,4295	0,1290	0,3590	0,3593	0,5851	0,2592	14,04
VA Tester	0,5213	0,4535	0,1347	0,3507	0,3841	0,5698	0,2859	13,44

### **Příklad výpočtů hodnot v tabulce Vyhodnocení měření č.1:**

Tab 5.1. Stejně rovnice se opakují i v tabulkách měření č.2, č.3 a č.4. Jsou proto uvedeny pouze zde.

$$FF = \frac{U_M \cdot I_M}{U_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{0,359 \cdot 0,3593}{0,5133 \cdot 0,4295} = 0,5851$$

$$R_s = \frac{\Delta U_{sc}}{\Delta I_{sc}} = \frac{0,0518}{0,2} = 0,2592 \Omega \quad R_{sh} = \frac{\Delta U_{oc}}{\Delta I_{oc}} = \frac{0,2}{0,0142} = 14,04 \Omega$$

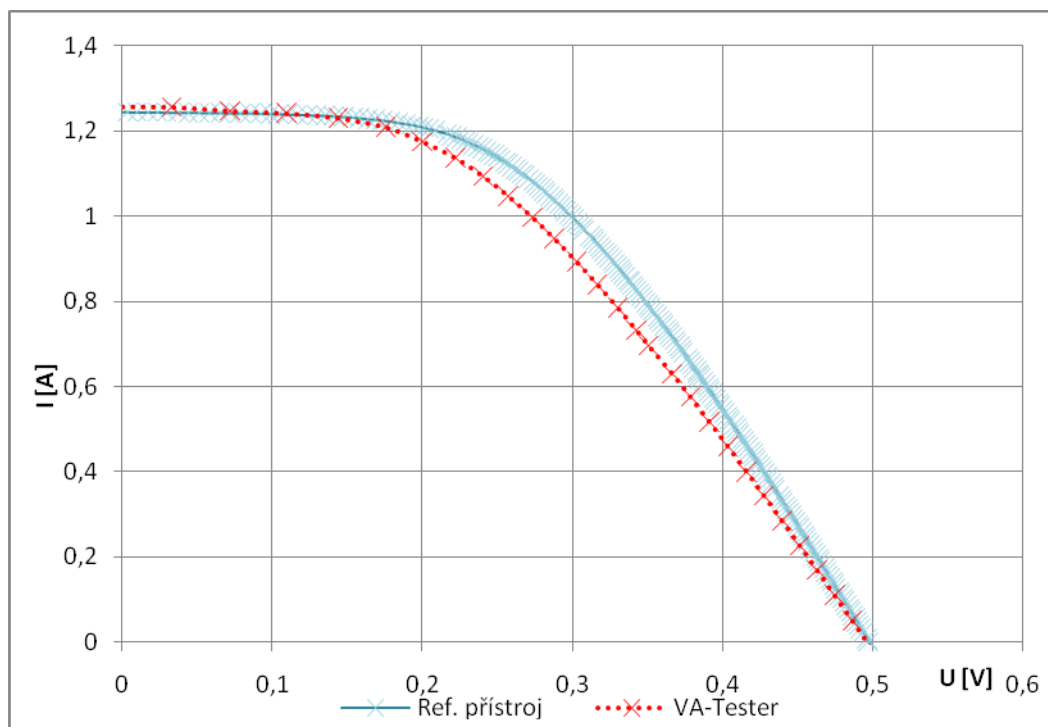


**Obr 5.3 Vyhodnocení měření č.1**

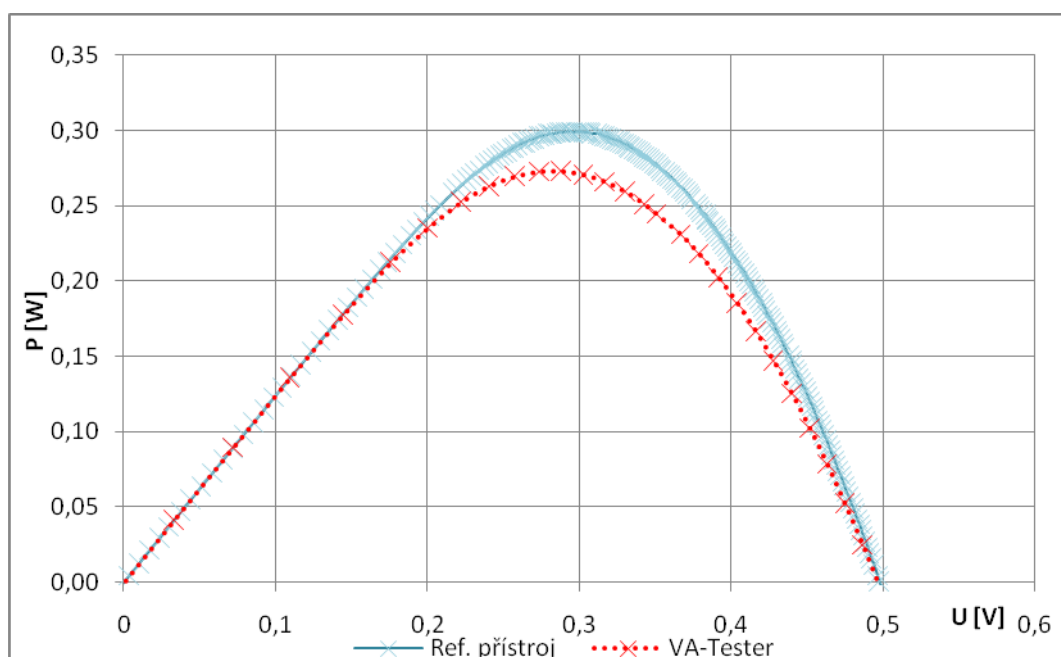
Jak již bylo zmíněno, průběh změřený referenčním přístrojem vlivem kmitajícího osvětlení kmital. Je třeba brát v úvahu, že hodnota  $I_{SC}$  byla získána jako průměrná hodnota z naměřených hodnot referenčního přístroje v lineární oblasti VA charakteristiky.

### Měření č.2:

FV monokrystalický článek č.1 byl osvětlen halogenovou lampou napájenou z baterie ze vzdálenosti 22 cm. Intenzita osvětlení dopadající na FV článek byla  $475 \text{ W/m}^2$ .



**Obr 5.4 VA charakteristika změřená ref. přístrojem a FV- Testerem při osvětlení halogenovou lampou napájenou z baterie  $E = 475 \text{ W/m}^2$**



**Obr 5.5 Výkonová charakteristika změřená ref. přístrojem a FV- Testerem při osvětlení halogenovou lampou napájenou z baterie  $E = 475 \text{ W/m}^2$**

Nastavení FV-Testeru:

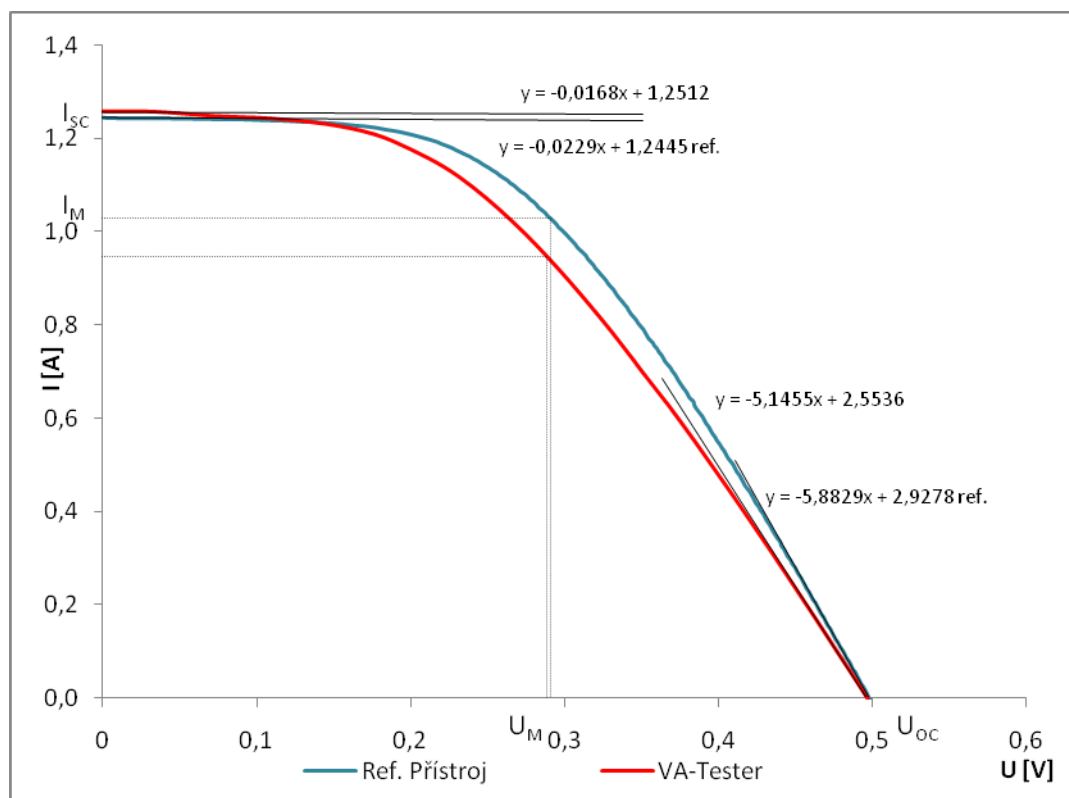
Počet kroků - 50; Proudový rozsah – 3 A; Napětový rozsah – 100 V; Maximální proud zdroje – 2 A; Maximální napětí zdroje – 1 V

### Vyhodnocení měření č.2:

**Tab 5.2 Důležité parametry měření č. 2**

	$U_{oc}$ [V]	$I_{sc}$ [A]	$P_M$ [W]	$U_M$ [V]	$I_M$ [A]	FF [-]	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$R_{sh}$ [ $\Omega$ ]
SC Tester	0,4976	1,2445	0,2991	0,2908	1,028542	0,4830	0,1698	53,67
VA Tester	0,4964	1,2512	0,2729	0,2881	0,9474	0,4373	0,1943	59,52

Příklady výpočtů hodnot v tabulce jsou stejné jako v měření č.2.



**Obr 5.6 Vyhodnocení měření č.2**

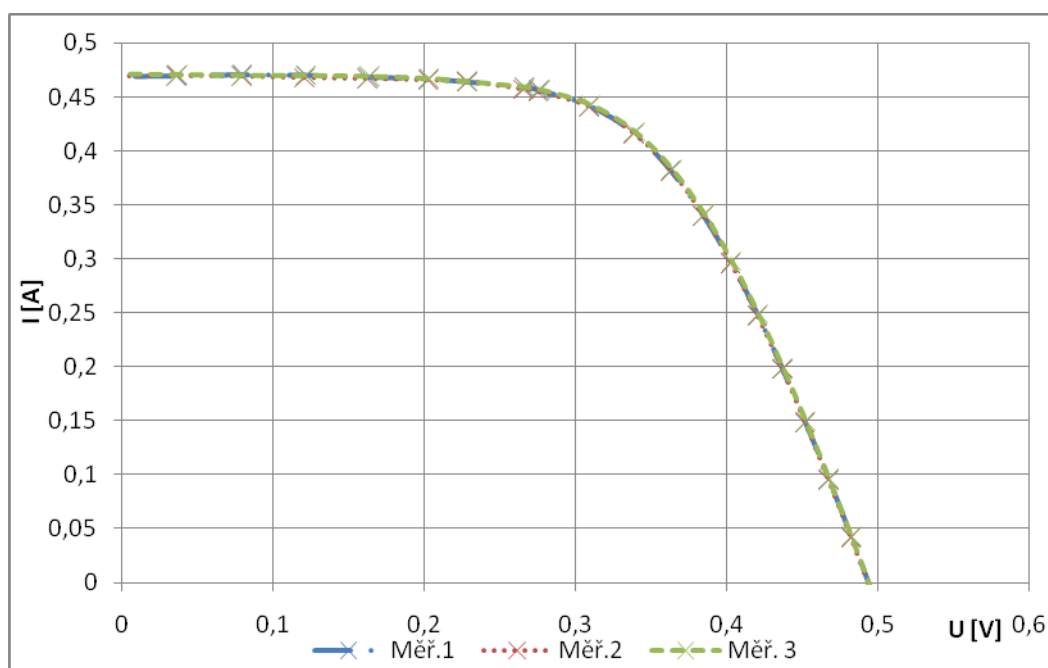
Z měřených průběhů je patrné že zatímco paralelní odpor získaný z obou přístrojů se skoro neliší, tak naměřená hodnota sériový odpor přístrojem SC-Tester je nižší než u přístroje VA-Tester, což může být zapříčiněno menším vnitřním odporem ampérmetru a vhodnějším experimentálním uspořádáním (čtyřvodičovým zapojením, který eliminuje parazitní odpory vodičů) v měřicí sestavě SC-Testeru.

### Měření č.3:

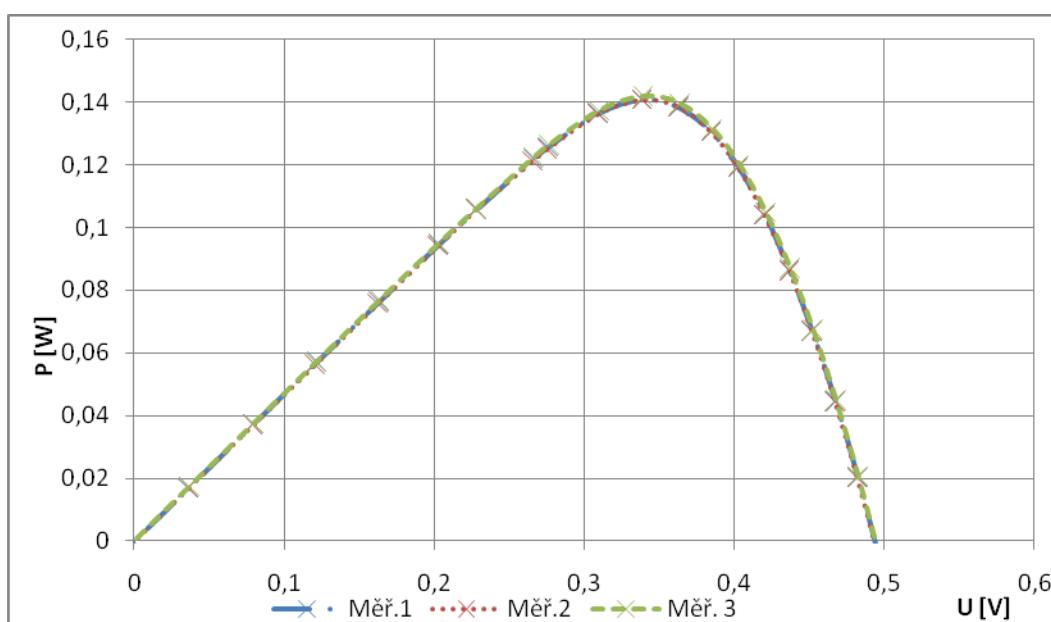
FV monokrystalický článek č.1 byl osvětlen halogenovou lampou napájenou z baterie ze vzdálenosti 32 cm. Intenzita osvětlení dopadající na FV článek byla  $206\text{W/m}^2$ .

Nastavení FV-Testeru:

Počet kroků - 50; Proudový rozsah – 3 A; Napěťový rozsah – 100 V; Maximální proud zdroje – 2 A; Maximální napětí zdroje – 1 V



Obr 5.7 VA charakteristika změřená 3x přístrojem FV- Testerem s časovou prodlevou 1 h

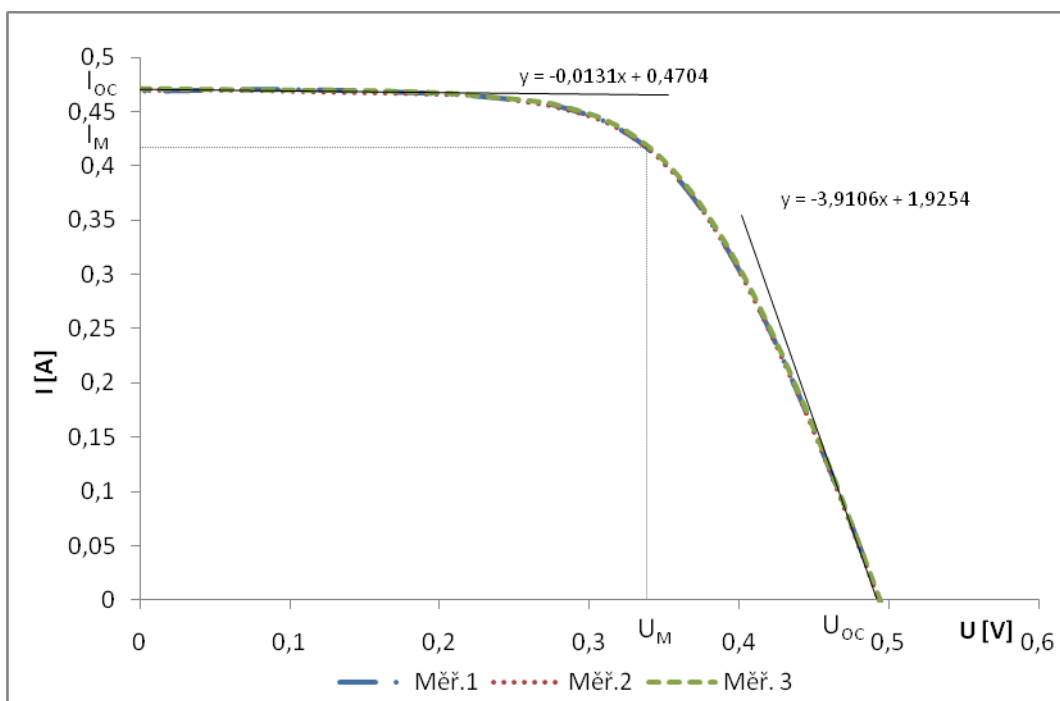


Obr 5.8 Výkonová charakteristika změřená 3x přístrojem FV-TESTER s časovou prodlevou 1 h

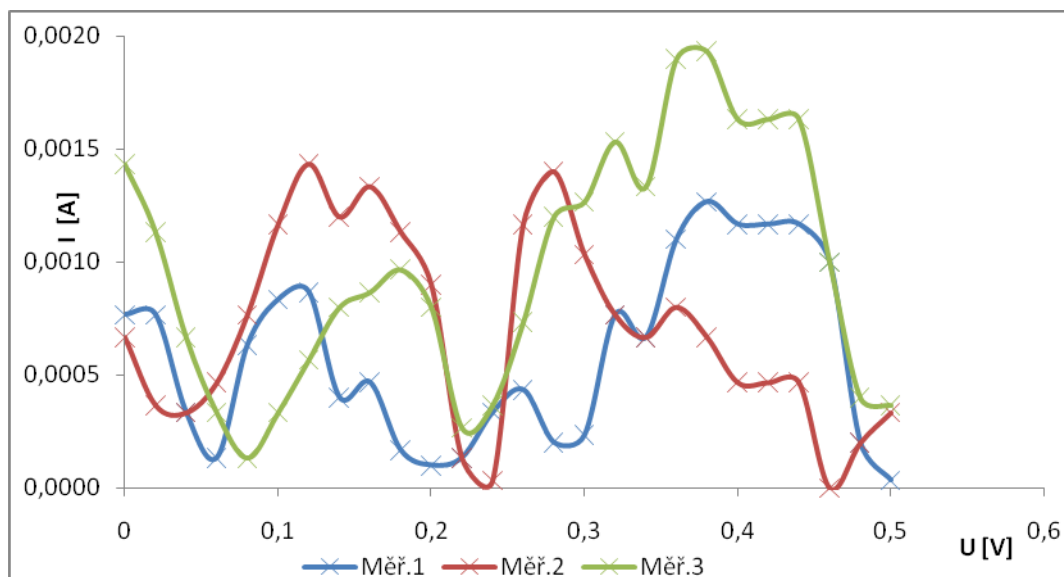
**Vyhodnocení měření č.3:**

**Tab 5.3 Důležité parametry měření č. 3**

Č. měření	$U_{OC}$ [V]	$I_{SC}$ [A]	$P_M$ [W]	$U_M$ [V]	$I_M$ [A]	FF [-]	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$R_{sh}$ [ $\Omega$ ]
1	0,4931	0,4704	0,1409	0,3384	0,4164	0,6075	0,2656	62,11
2	0,4934	0,4705	0,1410	0,3389	0,4160	0,6074	0,2657	62,11
3	0,4927	0,4707	0,1409	0,3384	0,4164	0,6076	0,2655	62,11



**Obr 5.9 Vyhodnocení měření č.3**



**Obr 5.10 Vývoj absolutní hodnoty odchylka měření**

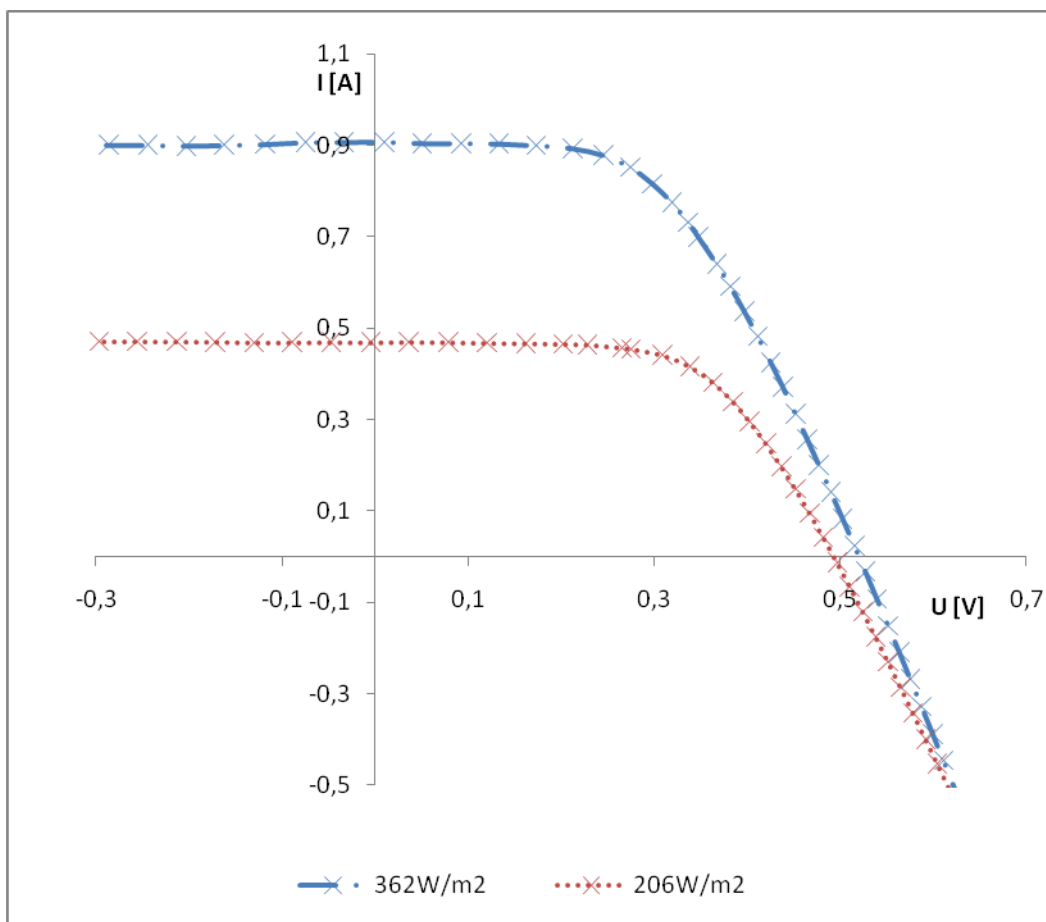
Z důvodu ověření opakovatelnosti měření probíhalo 3x po sobě v rozmezí jedné hodiny. Byl stanoven napěťový krok 0,02 V, odečítání probíhalo přímo z grafu, a pro každou hodnotu parametru napětí byla odečtena hodnota proudu. Průběhy proudu byly zprůměrovány a vyneseny odchylky jednotlivých hodnot od průměru. Chyba vzniklá odečítáním z grafu byla pro tento účel zanedbána. Maximální absolutní hodnota chyby měření je 0,00193A.

#### Měření č.4:

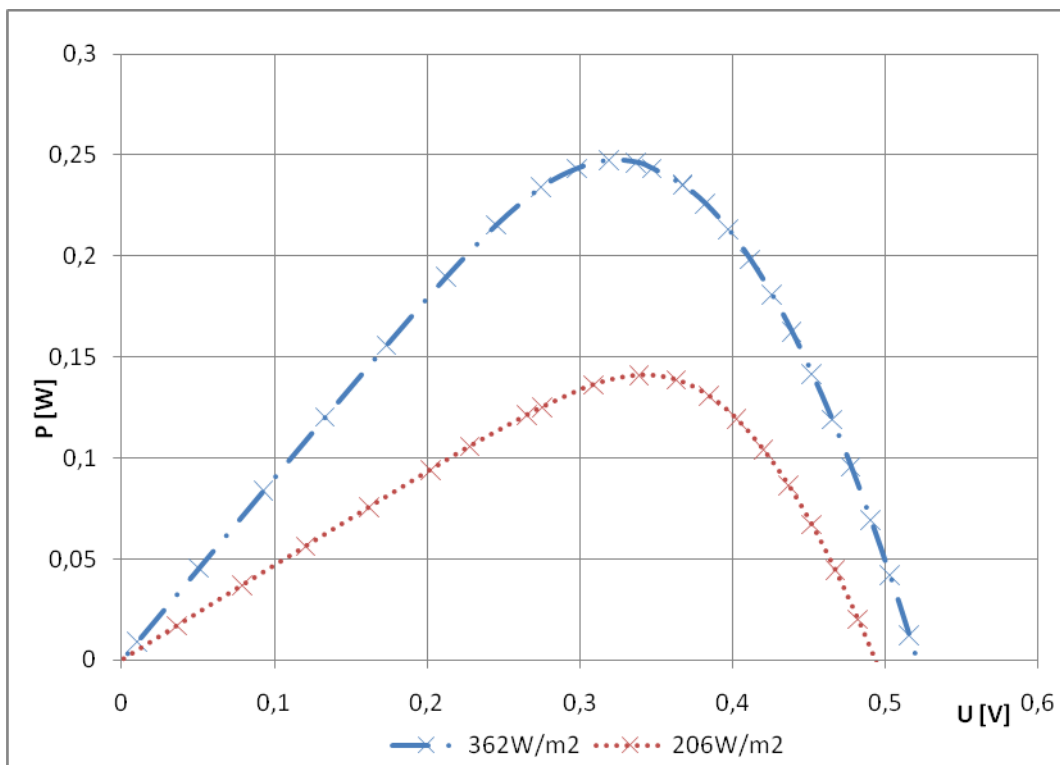
FV monokrystalický článek č.1 byl osvětlen halogenovou lampou napájenou z baterie ze vzdáleností 25 cm a 32 cm. Intenzita osvětlení dopadající na FV článek byla 362 W/m<sup>2</sup> a 206 W/m<sup>2</sup>

Nastavení FV-Testeru:

Počet kroků - 50; Proudový rozsah – 3 A; Napěťový rozsah – 100 V; Maximální proud zdroje – 2 A; Maximální napětí zdroje – 1 V

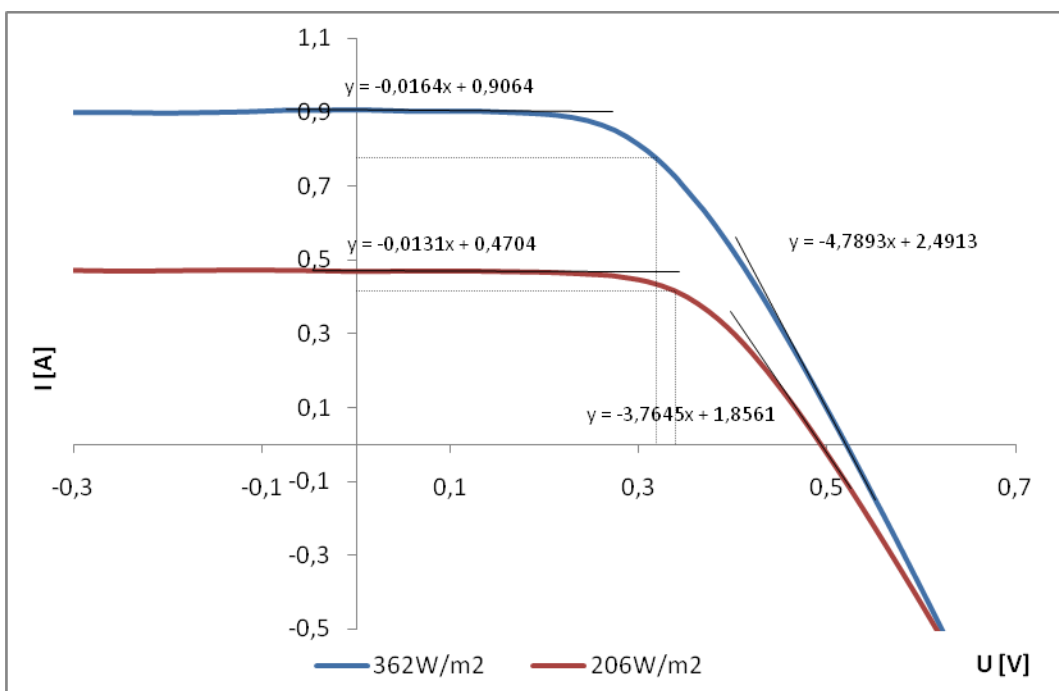


**Obr 5.11 VA charakteristika změřená přístrojem FV- Testerem pro různé hodnoty intenzity  
stejnoseměrného osvětlení**



Obr 5.12 Výkonová charakteristika změřená přístrojem FV- Testerem pro různé hodnoty intenzity stejnosměrného osvětlení

### Vyhodnocení měření č.3:



Obr 5.13 Vyhodnocení měření č.4

**Tab 5.4 Důležité parametry měření č. 4**

$E [W/m^2]$	$U_{oc} [V]$	$I_{sc} [A]$	$P_M [W]$	$U_M [V]$	$I_M [A]$	$FF [-]$	$R_s [\Omega]$	$R_{sh} [\Omega]$
206	0,4931	0,4704	0,1409	0,3384	0,4164	0,6075	0,2656	62,11
362	0,5202	0,9064	0,2474	0,3189	0,7755	0,5247	0,2088	60,98

Příklady výpočtů hodnot v tabulce jsou stejné jako v měření č.1.

Měření demonstruje zvýšení výkonu a změnu všech parametrů FV článku při zvýšení intenzity osvětlení. VA-Tester měří i záporné hodnoty napětí a proudu jak je vidět na Obr 5.13. Mírné posunutí „kolena“ VA charakteristiky vlevo je zapříčiněno zahříváním článku.



## 6. ZÁVĚR

V diplomové práci jsou popsány různé druhy energie dopadající ze slunce a jejich využití, historii fotovoltaiky, vývoj fotovoltaických článků. Dále je v práci vysvětlen fotoelektrický jev, princip generace a nábojové separace, způsob vytváření a měření VA charakteristik fotovoltaických článků a důležité parametry, které jsou ve IV. kvadrantu VA charakteristiky. Pomocí simulačního programu byly vytvořeny VA charakteristiky závislé na intenzitě osvětlení, teplotě, sériovém a paralelním odporu pro obecný fotovoltaický článek znázorněný dvoudiodovým modelem.

Praktická část je rozdělena na dvě části: návrh a naprogramování automatického měřicího pracoviště pro měření VA charakteristik fotovoltaických článků a kontrolního měření.

Ve fázi návrhu byla vybrána metoda měření pomocí proměnného zdroje, programování v grafickém programovacím jazyce LabVIEW formou řízení událostmi. K dispozici byl zdroj Agilent N6731B zasunutý v mainframe N6700B a multimetr Agilent 34410A. Komunikace s přístroji probíhá po sběrnici USB. Zdroj lze nastavovat pouze v rozmezí napětí 0-5 V. K změření celé VA charakteristiky je nutno nastavovat napětí i do záporných hodnot, proto byl vytvořen přepínač polarity, řízený digitálním výstupem zdroje. Práce popisuje postup programování v LabVIEW, vytvořené podpogramy, grafické uživatelské rozhraní a blokový diagram obslužného programu. V příloze A je podrobně popsán postup implementace knihoven a všechny potřebné kroky před prvním spuštěním FV-Testeru.

Program je přizpůsoben pro měření VA charakteristik FV článků osvětlených zdrojem světla napájeným ze střídavého i stejnosměrného zdroje. Měření proto trvá poměrně dlouhou dobu (5 – 100 s v závislosti na nastaveném počtu kroků). V případě, že zdroj osvětlení je napájen pouze z baterie, nebo zdroje stejnosměrného proudu, je možné zkrátit dobu průměrování měřené hodnoty a tím i výrazně zkrátit celkový čas měření.

V poslední fázi byly provedeny čtyři kontrolní měření, na dvou vzorcích monokrystalických fotovoltaických článků. První a druhé měření srovnává výsledky měření na vytvořené sestavě FV-Testeru a komerčně vyráběném referenčním přístroji Solar Cell Tester. Z prvního měření je vidět výhoda FV-Testeru, kdy je článek osvětlen halogenovou lampou napájenou ze střídavého zdroje světla, u přístroje Solar Cell testeru změřené hodnoty oscilují kolem VA charakteristiky u FV-Testeru tomu tak není. Naopak

nevýhodou je delší doba měření. Druhé měření bylo provedeno se zdrojem světla napájeným z baterie. Při srovnání FV-Testeru a Solar Cell testeru, byl u FV-Testeru zjištěn vyšší parazitní sériový odpor. Třetí měření se zabývá opakovatelností měření, kdy byla VA charakteristiky fotovoltaiického článku změřena třikrát s rozestupem 1h. Čtvrté měření se zabývá vlivem změny intenzity osvětlení na VA charakteristiku.

Z výsledků měření je patrné, že oba zkoumané FV články jsou defektní, vyplývá to z tvaru VA charakteristik.

Je třeba zdůraznit, že měření neprobíhalo v ideálních podmínkách. Pro zlepšení by FV článek měl být vložen do temné komory s jediným zdrojem osvětlení napájeným stejnosměrným proudem. Pro testování FV článků se uvádějí standardní podmínky měření:  $1000 \text{ W/m}^2$ , AM 1,5 a teplota  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ , které z důvodu nedostatečného zdroje osvětlení nebylo možné dodržet.

## 7. CITOVANÁ LITERATURA

- [1] **Czech Renewable Energy Agency.** Fotovoltaika pro každého. *Czech Renewable Energy Agency*. [Online] [Citace: 19. Duben 2010.] <http://www.czrea.org/cs/druhy-ozefotovoltaika>.
- [2] **Havránek, Miroslav.** Organické polymery jako zdroj energie. *Aldebaran Bulletin*. Týdenní, 2007, Sv. 30, 1.
- [3] **Murtinger, Karel, Beranovský, Jiří a Tomeš, Milan.** *Fotovoltaika. Elektřina ze slunce*. Brno : Vydavatelství ERA, 2007. ISBN: 97-80-7366-100-7.
- [4] **Horský, P.** Fotoelektrický jev. *Katedra obecné fyziky*. [Online] Fakulta pedagogická. [Citace: 6. prosinec 2009.] <http://www.kof.zcu.cz/st/dp/horsky/html/2fotoel.html>.
- [5] **Boyle, Godfrey.** *Renewable energy*. Oxford : Oxford University Press, 2004. ISBN 0-19-926178-4.
- [6] **Jiří, Vaněk, Křivík, Petr a Novák, Vítězslav.** *Alternativní zdroje energie*. [Dokument] Brno : Vysoké učení technické v Brně, Vysoké Učení Technické v Brně, 2006.
- [7] **Quaschnig, Volker.** *Understanding renewable energy systems*. místo neznámé : Carl Hanser Verlag, 2005. ISBN 978-1-84407-128-9.
- [8] **Vaněk, Jiří, Křivík, Petr a Novák, Vítězslav.** *Alternativní zdroje energie laboratorní cvičení*. [Dokument] Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2007.
- [9] **Bannert, Petr.** Charakteristické odpory fotovoltaických článků. [Online] 9. Listopad 2008. [Citace: 5. Květen 2011.] [http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS\\_004\\_cviceni/004\\_charakteristicke\\_odpory\\_fvc.pdf](http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS_004_cviceni/004_charakteristicke_odpory_fvc.pdf).
- [10] **Agilent technologies.** Agilent 34410A - User's Guide. *www.agilent.com*. [Online] Červenec 2007. [Citace: 13. Duben 2010.] <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/34410-90004.pdf>.
- [11] **Agilent Technologies.** Agilent N6700 MPS, Low-Profile Modular Power System. *www.agilent.com*. [Online] 16. 6 2007. [Citace: 13. Duben 2010.] <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-1411EN.pdf>. 5989-1411EN.
- [12] **Luque, Antonio a Hegedus, Steve.** *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Madrid, Delaware : Wiley, 2003. ISBN 0-471-49196-9.

## SEZNAM ZKRATEK A KONSTANT

<b>Zkratka</b>	<b>Celý název/Význam</b>
$h$	planckova konstanta
$f$	frekvence záření
$c$	rychlost světla
$\lambda$	vlnová délka
$E_{\text{fot}}$	energie fotonu
$E_g$	energie zakázaného pásu (min. energie potřebná k emitování el.)
$E_{\text{el}}$	energie emitovaného elektronu
$S$	plocha fotovoltaického článku
$U$	napětí
$I$	proud
$P$	výkon
$E$	intenzita osvětlení
$R_s$	sériový odpor
$R_p$	paralelní odpor
$U_{\text{oc}}$	napětí naprázdno
$I_{\text{sc}}$	proud nakrátko
$P_m$	maximální výkon
$U_m$	napětí při maximálním výkonu
$I_m$	proud při maximálním výkonu
$\eta$	účinnost
$V$	volt
$A$	ampér
$VA$	volt ampér
$FF$	Fill Factor
$GUI$	Graphic User Interface
$DMM$	digitální multimetr
$USB$	Universal Serial Bus
$SC$	Solar Cell

## SEZNAM PŘÍLOH

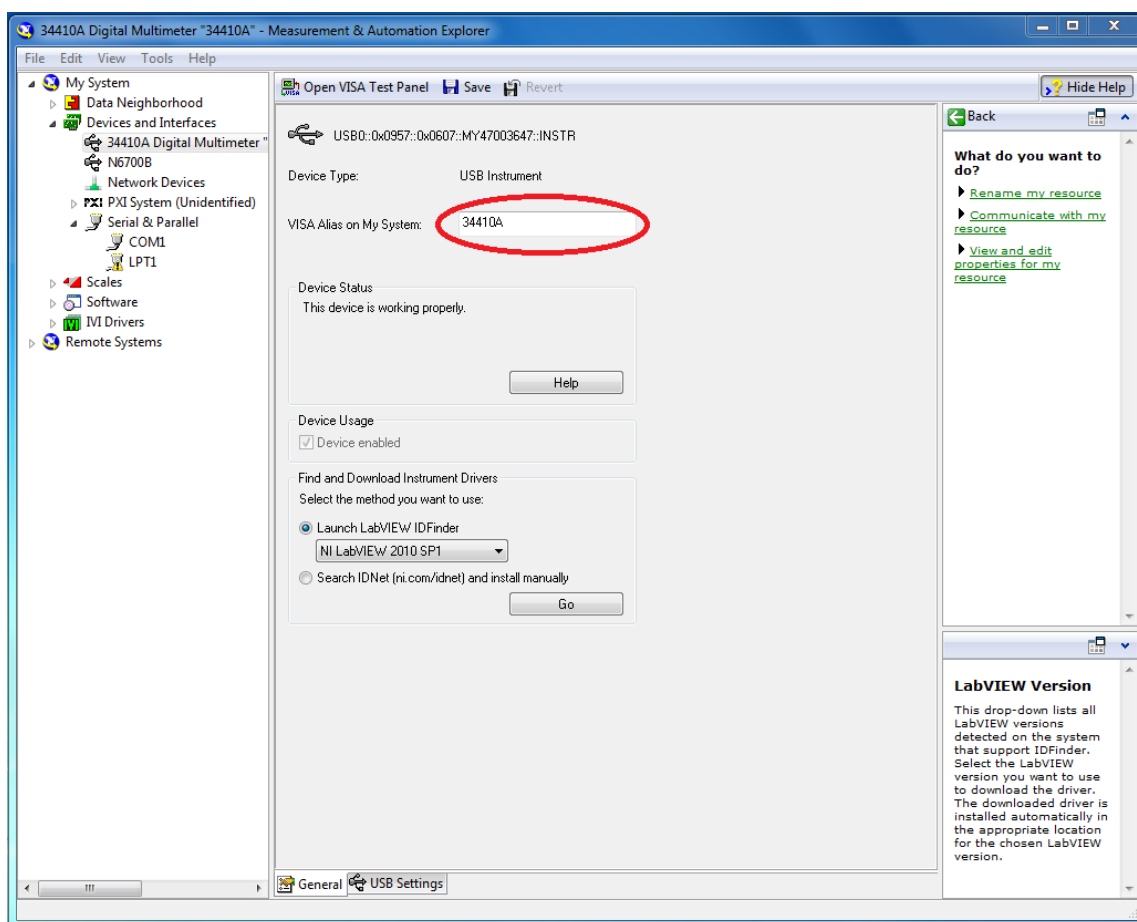
Příloha A Postup nastavení zástupných jmen a instalace knihoven	55
Příloha B Vytvořené podprogramy LabVIEW	56
Příloha C Blokový diagram hlavní smyčky obslužného programu	60
Příloha D Měřicí pracoviště	61

## Příloha A Postup nastavení zástupných jmen a instalace knihoven

### 1. Spusťte program Measurement a Automation

Start -> Programy -> National Instruments -> Measurement a Automation

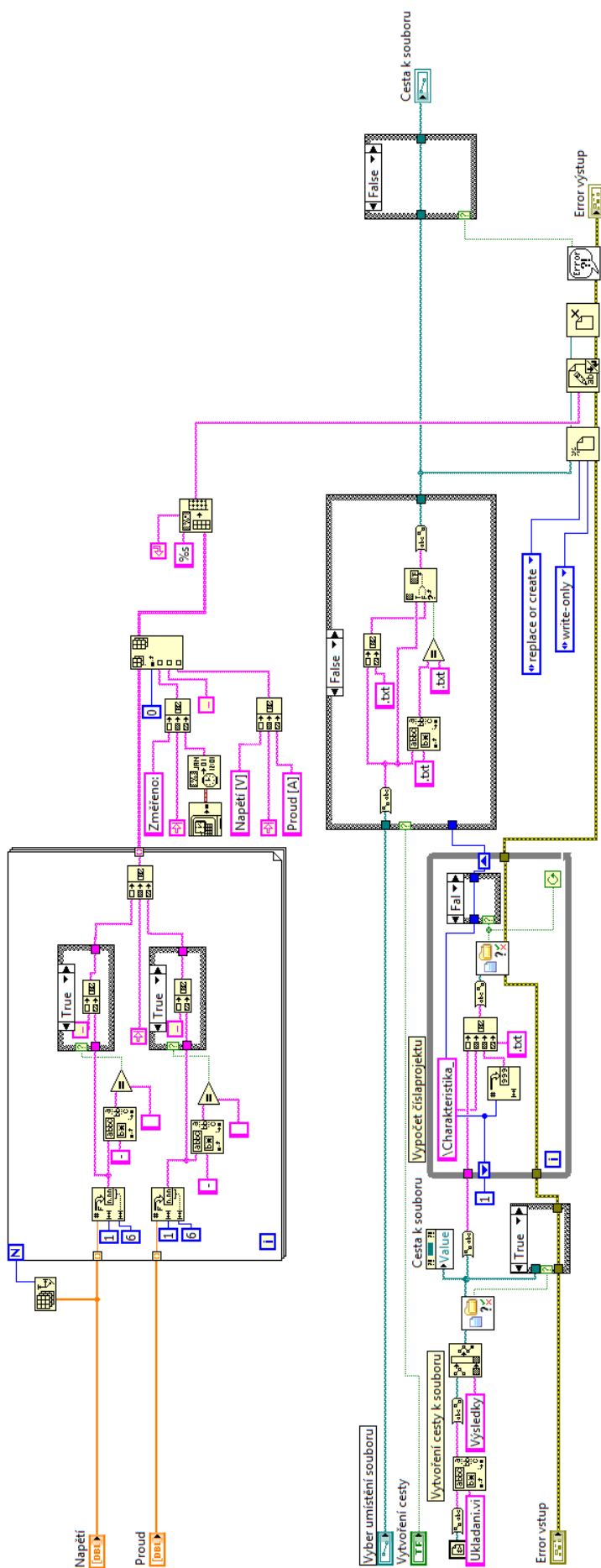
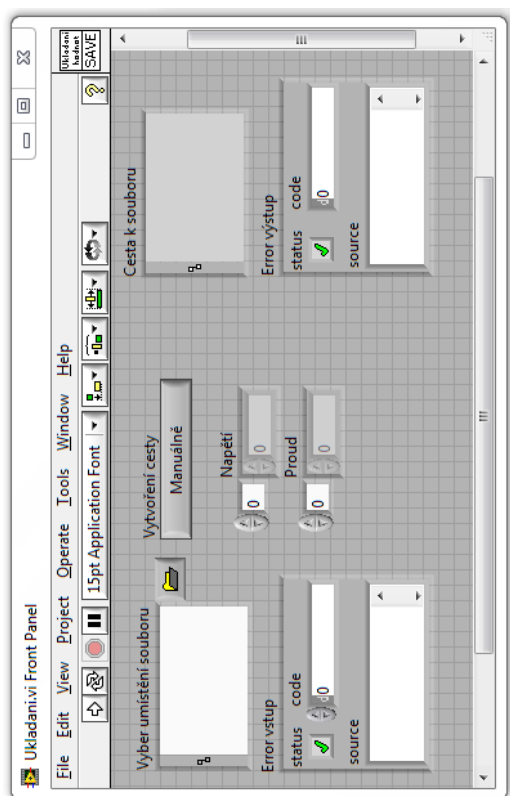
### 2. Zapněte zdroj a připojte jej do USB. Rozbalte roletové menu a klikněte na „Device and Interfaces“, klikněte na položku N6700B. V pravé části se zobrazí informace o přístroji. Přiřaďte zdroji jméno do kolonky „VISA Alias on My System“. Stejný postup opakujte pro multimetr.



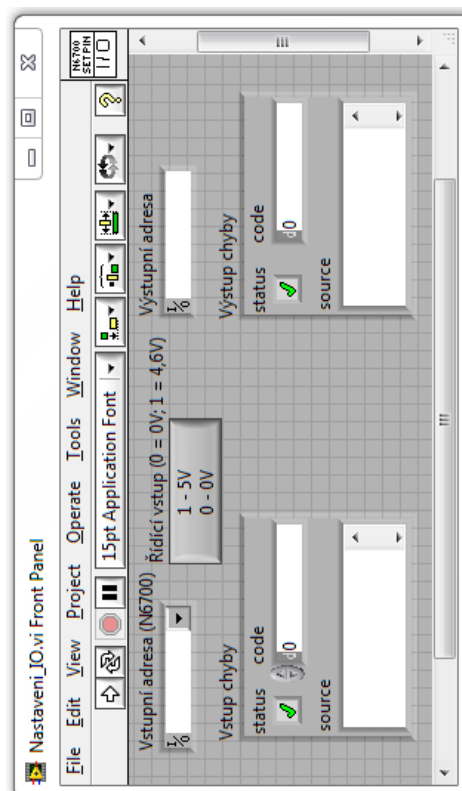
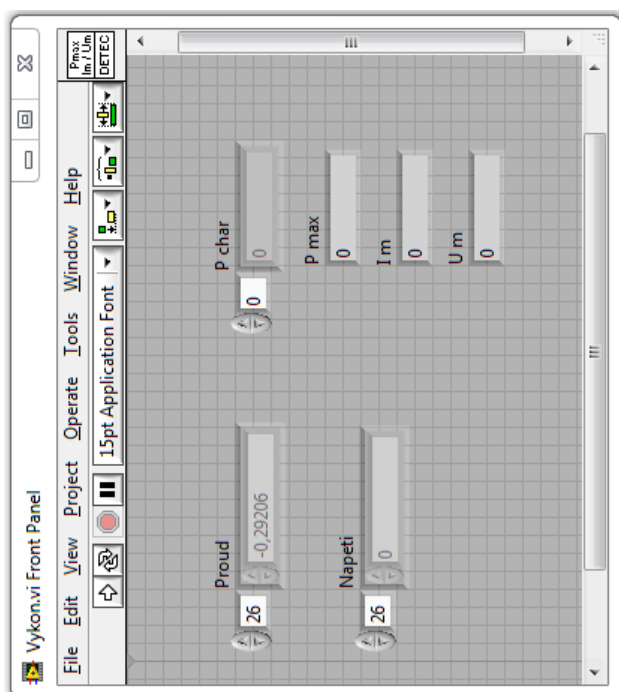
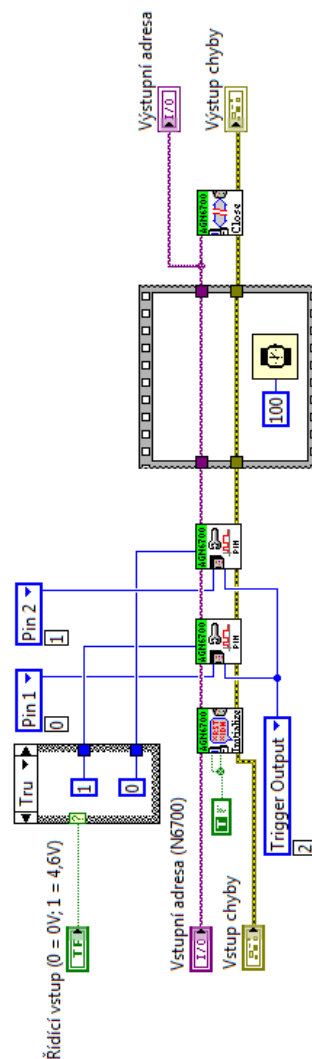
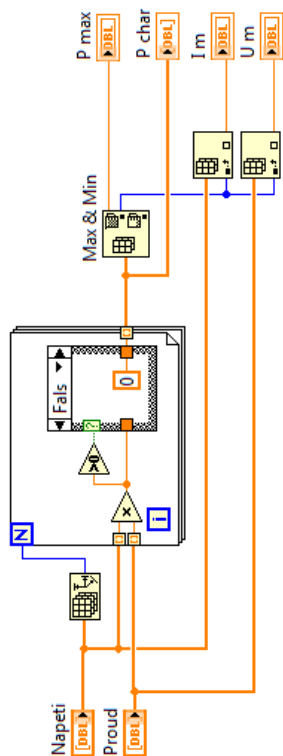
### 3. Do LabVIEW je nutné nahrát knihovny přístrojů. Knihovny jsou na přiloženém CD ve složce: Metadata\Knihovny\... Knihovny je třeba nahrát do složky, kde je nainstalované LabVIEW. Relativní cesta: ...\\LabVIEW\\instr.lib\\

### 4. Program ze spouští z CD. Nejprve zkopírujte knihovnu

Metadata\\Program\\VA-Tester.llb na místní disk. Poté ji otevřete a spustíte soubor Obslužný Program.

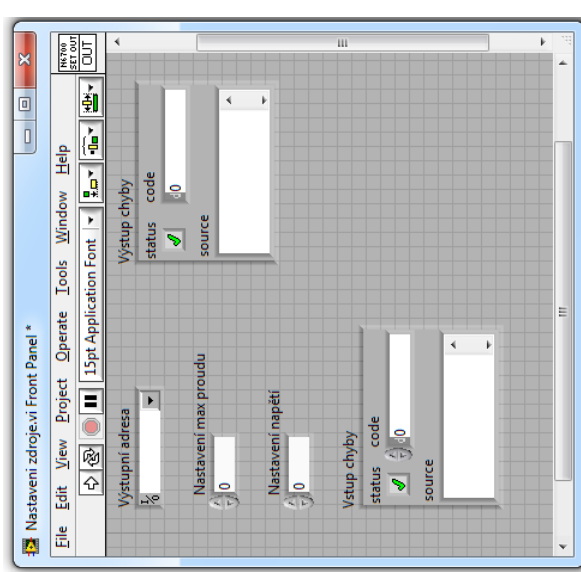
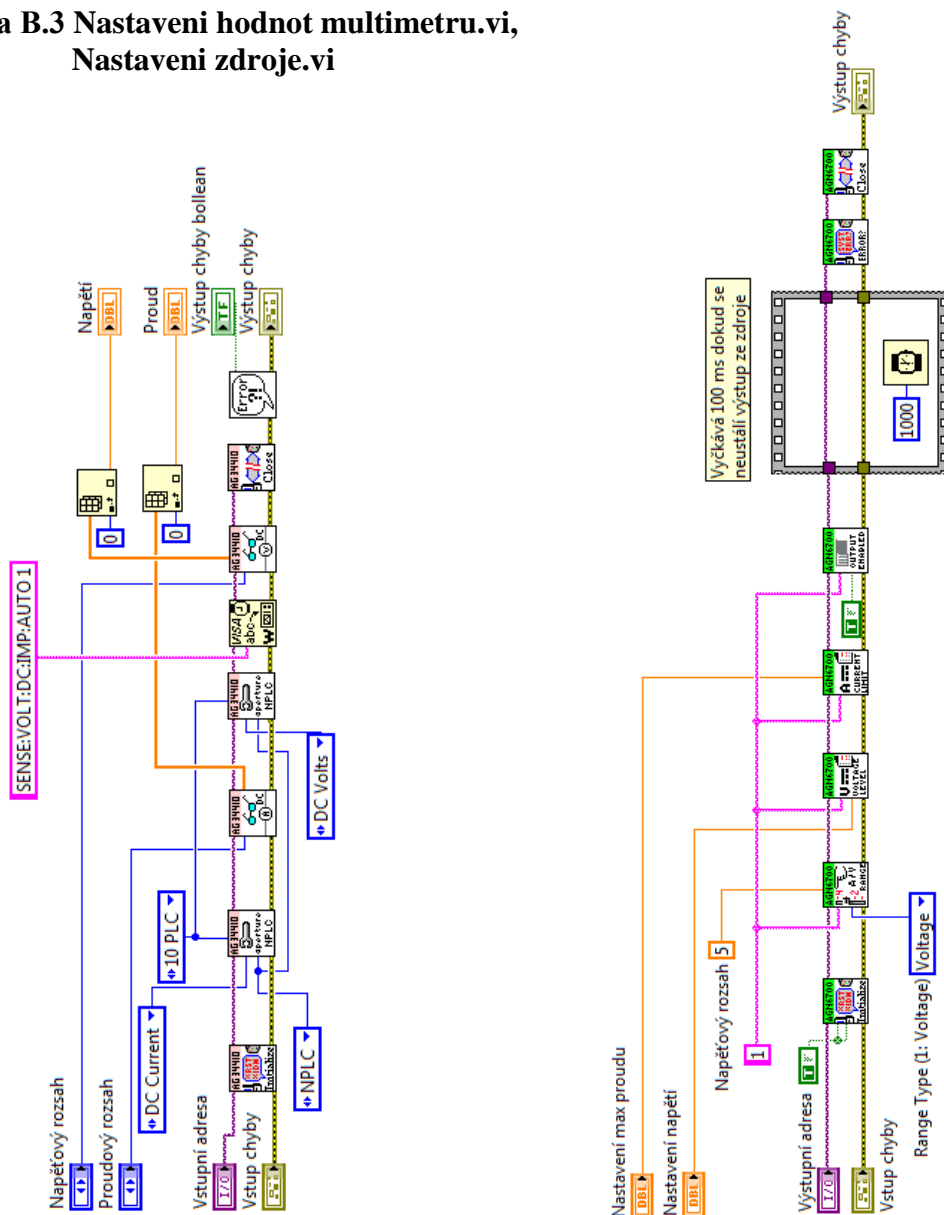
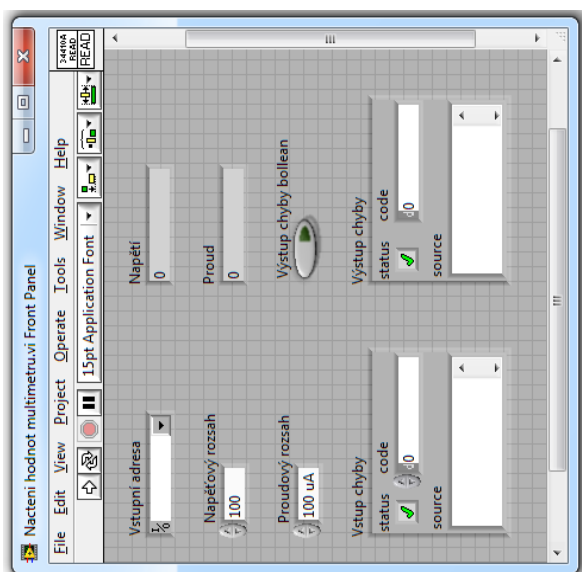


## Příloha B.2 Vykon.vi a Nastaveni\_IO.vi

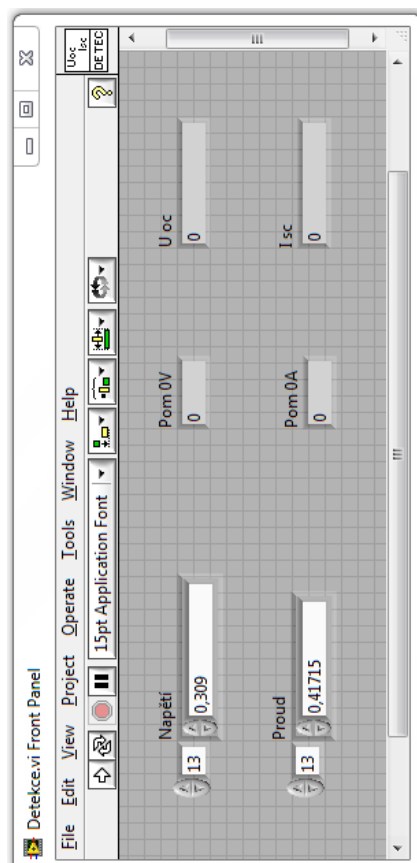
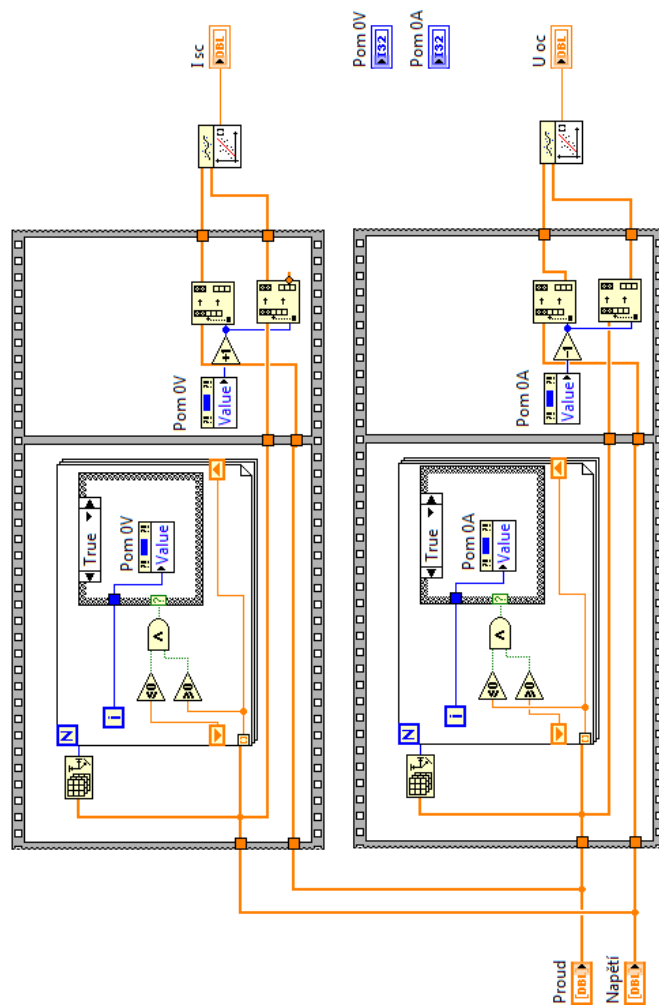
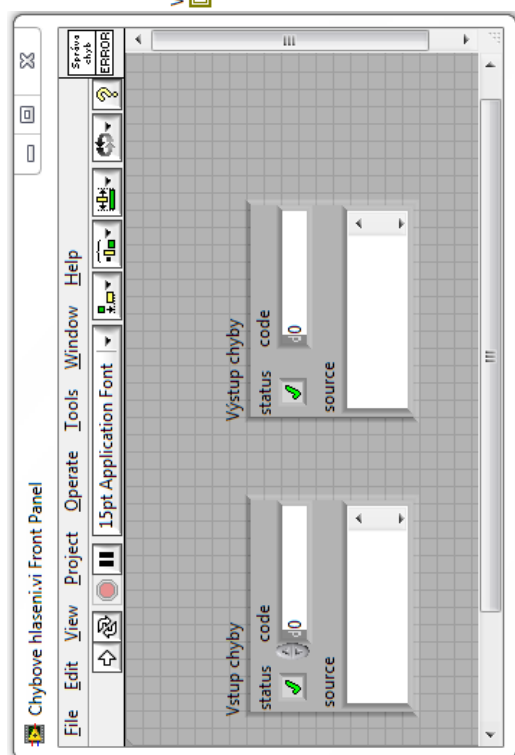




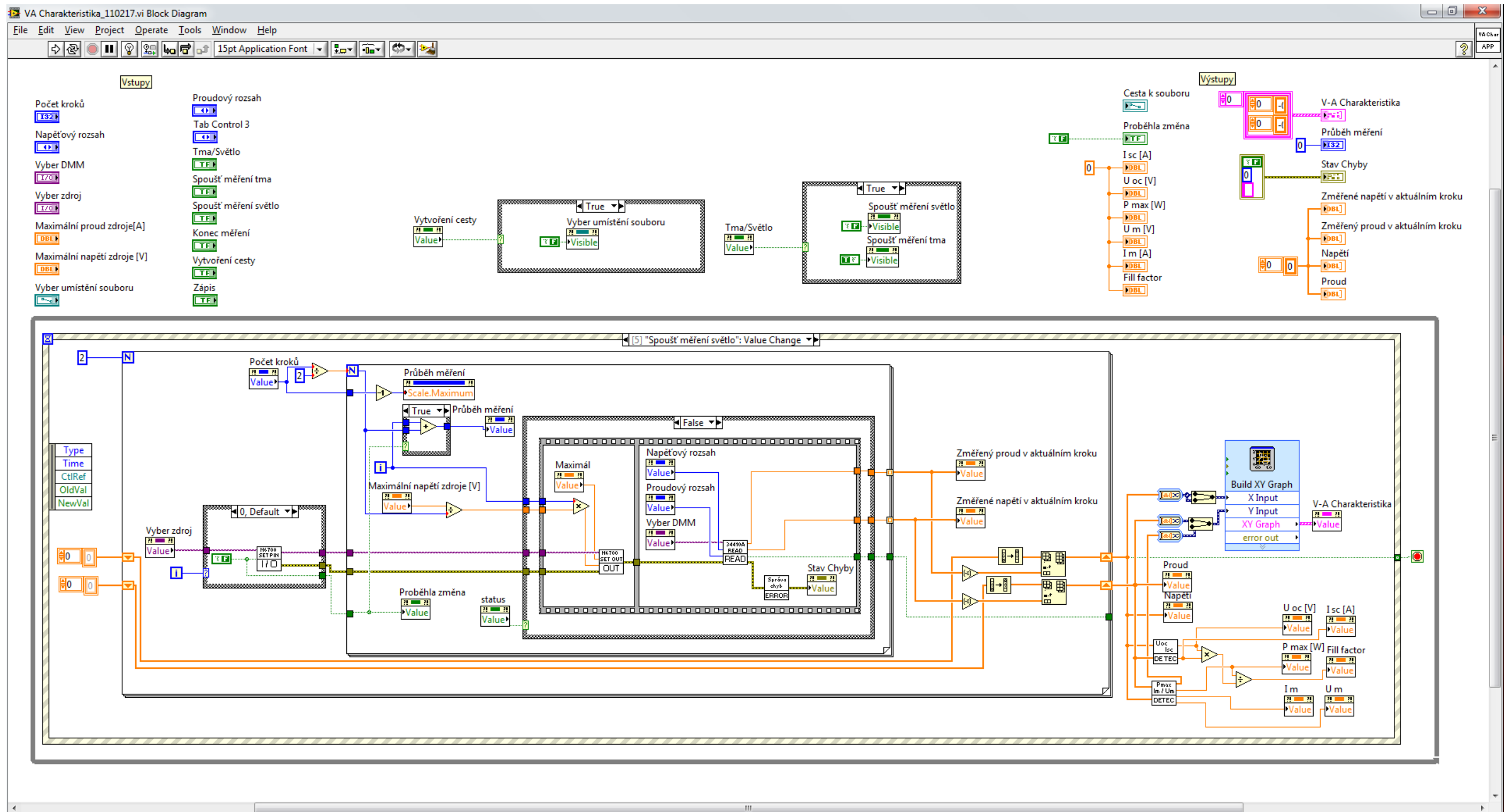
### **Příloha B.3 Nastavení hodnot multimetru.vi, Nastavení zdroje.vi**



## Příloha B.4 Chybové hlasení.vi, Detekce.vi



## Příloha C Blokový diagram hlavní smyčky obslužného programu



## Příloha D Měřicí pracoviště

